



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**TOPOLOGICKÁ OPTIMALIZACE POHYBLIVÉ, PEVNÉ A
ZÁKLADNÍ DESKY ELEKTROMECHANICKÉHO
VSTŘIKOLISU**

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MOVABLE, FIXED AND BASED PLATE OF ELECTROMECHANICAL
INJECTION-MOULDING MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Samuel Kecík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Samuel Kecík
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Tomáš Návrat, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Topologická optimalizace pohyblivé, pevné a základní desky elektromechanického vstřikolisu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S ohledem na současné využití plastů mají velký význam technologie spojené s jejich výrobou a zpracováním. Na výrobu velkých plastových dílů se používají vstřikolisy, které dokáží vyvinout velké lisovací a vstřikovací tlaky. Komponenty těchto lisů jsou masivní části, které musí mít dostatečnou tuhost a pevnost. Velikost a hmotnost těchto komponent přináší značné komplikace při montáži a transportu, proto je pozornost směřována na hledání možností jak snížit množství využitého materiálu při zachování jejich tuhosti. Cílem práce je návrh úpravy vybraných komponent lisu pomocí topologické optimalizace. Diplomová práce bude zpracována ve spolupráci s firmou KraussMaffei Technologies.

Cíle diplomové práce:

- 1) Přehled současných možností využití topologické optimalizace.
- 2) Popis algoritmu pro topologickou optimalizaci.
- 3) Vytvoření výpočtového modelu desek vstřikolisu, analýza zátěžných stavů a posuzovaných mezních stavů.
- 4) Aplikace topologické optimalizace na desky vstřikolisu.
- 5) Posouzení přínosů topologické optimalizace.
- 6) Pevnostní analýza výsledného návrhu desek.

Seznam doporučené literatury:

ZHANG, Weihong, Jihong ZHU a Tong GAO. Topology optimization in engineering structure design. London: Oxford, UK: ISTE Press Ltd.; Elsevier, 2016

QUERIN, Osvaldo M, Mariano VICTORIA, Cristina ALONSO, Rubén ANSOLA a Pascual MARTÍ.
Topology design methods for structural optimization. London: Elsevier; Academic Press, 2017

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom geometrie dosiek uzatváracej jednotky vstrekolisu s využitím MKP nástroju topologická optimalizácia. Dôvodom je zníženie hmotností týchto komponentov, čo je prínosné pri transporte a montáži vstrekolisu. Výsledné modely geometrie dosiek však musia spĺňať určité podmienky z hľadiska medzného stavu deformácie, medznému stavu voči kritickej hodnote redukovaného napätia. Táto podmienka v sebe zahŕňa MS pružnosti ale aj MS únavy. Výpočtové modelovanie ako aj samotná topologická optimalizácia je vykonaná v programe ANSYS Workbench.

Abstract

The master thesis deals with the design of geometry of plates of the injection molding unit using the FEM tool Topological Optimization. The reason for this is to reduce the weight of these components, which is beneficial in the transport and assembly of the injection molding machine. However, the final models of geometry of plates must meet certain requirements in terms of the limit state of deformation, the limit state to the critical value of the equivalent stress. This condition involves both limit state of elasticity and limit state of fatigue. Computational modeling and also Topological Optimization are performed in ANSYS Workbench.

Kľúčové slová

topologická optimalizácia, MKP, vstrekolis, uzatváracia jednotka, dosky, statická analýza, medzný stav

Keywords

topology optimization, FEM, injection-moulding machine, close unit, plates, static analysis, limit state

Citácia

KECÍK, Samuel. *Topologická optimalizace pohyblivé, pevné a základní desky elektromechanického vstřikolisu*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Návrát Tomáš.

Topologická optimalizace pohyblivé, pevné a základní desky elektromechanického vstřikolisu

Prehlásenie

Prehlasujem, že túto diplomovú prácu na tému *Topologická optimalizace pohyblivé, pevné a základní desky elektromechanického vstřikolisu* som vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Tomáša Návrata, Ph.D. s použitím literatúry uvedenej v zozname.

.....
Samuel Kecík
22. mája 2019

Podakovanie

Rád by som sa chcel poďakovať svojmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Tomášovi Návratovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady a pripomienky pri spracovaní tejto práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať Ing. Andrejovi Jakubisovi, Ph.D. a Ing. Mariánovi Kompišovi, Ph.D. z firmy KraussMaffei za taktiež odbornú pomoc a cenné rady k tejto práci.

Obsah

1	Úvod	7
2	Popis problémovej situácie	8
2.1	Formulácia problému	8
2.2	Ciele práce	8
2.3	Systém podstatných veličín	9
2.4	Voľba metódy riešenia	10
3	Technológia vstrekovania plastov	11
3.1	Vstrekovacie stroje	11
3.1.1	Uzatváracia jednotka	13
3.1.2	Vstrekovacia jednotka	16
3.1.3	Proces vstrekovacích strojov	16
4	Metódy optimalizácie topológie	18
4.1	Metódy zovšeobecnenej optimalizácie tvaru s využitím MKP	18
4.1.1	Topológie tvorené izotropnými pevnými alebo prázdny elementami - ISE-topológie	19
4.1.2	Topológie tvorené anizotropnými pevnými alebo prázdny elementami - ASE-topológie	22
4.1.3	Topológie tvorené izotropnými pevnými, prázdny alebo pórovitými elementami - ISEP, ISEC, ISECP-topológie	22
5	Topologická optimalizácia	24
5.1	Programy využívajúce Topologickú optimalizáciu	24
6	Topologická optimalizácia v programe Ansys Topological Optimization	28
6.1	Topologická optimalizácia v ANSYSE	29
7	Nastavenie výpočtového modelu - Statická analýza	37
7.1	Pevná doska KM200	37
7.2	Pohyblivá doska KM200	46
7.3	Základová doska	53
8	Topologická optimalizácia dosiek	59
8.1	Topologická optimalizácia pevnej dosky KM200	59
8.2	Topologická optimalizácia pohyblivej dosky KM200	62
8.3	Topologická optimalizácia základovej dosky KM200	64

9 Verifikácia výsledkov	68
9.1 Kontrolná statická analýza pevnej dosky KM200	68
9.2 Kontrolná statická analýza pohyblivej dosky KM200	71
9.3 Kontrolná statická analýza základovej dosky KM200	73
10 Porovnanie výsledkov	76
11 Záver	78
Literatúra	80
Prílohy	85
A Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov pevnej dosky KM50	87
B Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov pohyblivej dosky KM50	96
C Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov základovej dosky KM50	104

Zoznam obrázkov

3.1	Popis vstrekolisu [16]	12
3.2	Hydraulická uzatváracia jednotka s hydraulickým valcom napojeným priamo na pohyblivú dosku [14] A: ovládací piest, B: odnímateľný medzerník, C: Forma, D: vstrekovacia tryska, E: pevná upínacia doska, F: pohyblivá upínacia doska, G: vodiaci stĺp, H: základová (oporná) doska valca, I: upínací hydraulický valec	14
3.3	Hydraulická uzatváracia jednotka s kľbovým mechanizmom [14] A: pohyblivá upínacia doska, B: pevná upínacia doska, C: forma, D: predný spoj kľbového mechanizmu, E: zadný spoj kľbového mechanizmu, F: ovládací (hydraulický) valec, G: vodiaci stĺp, H: krížny spoj kľbového mechanizmu	14
3.4	Elektrická uzatváracia jednotka s kľbovým mechanizmom rady EX od firmy KraussMaffei [2]	15
3.5	Elektrická uzatváracia jednotka s guľčkovými skrutkami [16]	15
3.6	Šneková vstrekovacia jednotka [19]	16
3.7	Schéma vstrekovacieho cyklu [5]	17
4.1	ISE-topológia: (a) návrhová oblasť pokrytá MKP sieťou, (b) neprípustné riešenie, (c) optimálne riešenie, (d-f) prípustné avšak nie optimálne riešenie [17]	19
4.2	ASE-topológia [17]	22
4.3	ISEP-topológia tvorená mikrolaminátmi druhého rádu [17]	23
5.1	Všeobecná schéma topologickej optimalizácie SIMP metódou [13]	25
6.1	Rozmery telesa	28
6.2	Modelový príklad - okrajové podmienky	29
6.3	Schéma výpočtu	30
6.4	Výsledok TO modelového príkladu s funkciou Extrusion podľa osi Z a podľa osi X	32
6.5	a) sieť a výsledok TO pre 80000 prvkov b) sieť výsledok TO pre 5120 prvkov	34
6.6	Typy mriežok používajúce sa v Lattice Optimization [9]	35
6.7	Vyplnenie vnútorného objemu Crossed mriežkou	36
7.1	Geometria pevnej dosky KM200	38
7.2	Detail siete pevnej dosky KM200	38
7.3	Silový tok medzi doskami KM200	39
7.4	Zobrazenie vodiacich valcov KM200, cez ktoré sa prenáša sila medzi pevnou (úplne vpravo) a základovou doskou (úplne vľavo)	40
7.5	Veľkosť minimálnej formy pre vstrekolis KM200	40

7.6	Okrajové podmienky pevnej dosky KM200	41
7.7	Deformácia pevnej dosky KM200	41
7.8	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM200	42
7.9	Redukované napätie v pevnej dosky KM200	43
7.10	Schématické označenie pôsobenia gravitačných síl od formy vo vstrekolise KM200	44
7.11	Okrajové podmienky pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	45
7.12	Deformácia pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	45
7.13	Redukované napätie pevnej platne KM200 v druhom záťažnom stave	46
7.14	Geometria pohyblivej dosky KM200	47
7.15	Detail siete pohyblivej dosky KM200	47
7.16	Detail spodných ramien kĺbového mechanizmu KM200	48
7.17	Zobrazenie uhlov na vstrekolise KM200, pod ktorými pôsobia sily na dosky	49
7.18	Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM200	50
7.19	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM200	50
7.20	Redukované napätie v pohyblivej dosky KM200	51
7.21	Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	52
7.22	Deformácia pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	52
7.23	Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	53
7.24	Geometria základovej dosky KM200	54
7.25	Detail siete základovej dosky KM200	54
7.26	Okrajové podmienky základovej dosky KM200	55
7.27	Redukované napätie základovej dosky KM200	56
7.28	Celková deformácia základovej dosky KM200	56
7.29	Okrajové podmienky základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	57
7.30	Celková deformácia základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	58
7.31	Redukované napätie základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave	58
8.1	Znázornenie objemov pevnej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO	59
8.2	Constrainy pevnej dosky KM200	60
8.3	Výsledky z topologickej optimalizácie pre pevnú dosku KM200 - vľavo <i>MASS</i> 80%, v strede <i>MASS</i> 70%, vpravo <i>MASS</i> 60%	61
8.4	Výsledný upravený model geometrie pevnej dosky KM200	61
8.5	Znázornenie objemov pohyblivej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO	62
8.6	Constrainy pohyblivej dosky KM200	63
8.7	Výsledky z topologickej optimalizácie pre pohyblivú dosku KM200 - vľavo <i>MASS</i> 80%, v strede <i>MASS</i> 70%, vpravo <i>MASS</i> 60%	63
8.8	Výsledný upravený model geometrie pohyblivej dosky KM200	64
8.9	Znázornenie objemov základovej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO	65
8.10	Constrainy základovej dosky KM200	65
8.11	Výsledky z topologickej optimalizácie pre základovú dosku KM200 - vľavo <i>MASS</i> 80%, v strede <i>MASS</i> 70%, vpravo <i>MASS</i> 60%	66
8.12	Výsledný upravený model geometrie základovej dosky KM200	66
9.1	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej platne KM200 výsledného modelu	69
9.2	Redukované napätie pevnej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	70

9.3	Redukované napätie pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	70
9.4	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM200 výsledného modelu	71
9.5	Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	72
9.6	Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	73
9.7	Redukované napätie základovej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	74
9.8	Redukované napätie základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	75
10.1	Pôvodná pevná doska (vľavo) Upravená pevná doska (vpravo)	76
10.2	Pôvodná pohyblivá doska (vľavo) Upravená pohyblivá doska (vpravo) . . .	77
10.3	Pôvodná základová doska (vľavo) Upravená základová doska (vpravo) . . .	77
A.1	Geometria pevnej dosky KM50	87
A.2	Veľkosť minimálnej formy pre vstrekolis KM50	88
A.3	Okrajové podmienky pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	88
A.4	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	89
A.5	Redukované napätie pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	89
A.6	Schématické označenie pôsobenia gravitačných síl od formy vo vstrekolise KM50	90
A.7	Okrajové podmienky pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave	90
A.8	Redukované napätie pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave	91
A.9	Znázornenie objemov pevnej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO . . .	91
A.10	Constrains pevnej dosky KM50	92
A.11	Výsledky z topologickej optimalizácie pre pevnú dosku KM50 - vľavo <i>MASS</i> 80%, v strede <i>MASS</i> 70%, vpravo <i>MASS</i> 60%	92
A.12	Pôvodná pevná doska KM50 (vľavo) Upravená pevná doska KM50 - CAD model (vpravo)	93
A.13	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM50 výsledného modelu	94
A.14	Redukované napätie pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	94
A.15	Redukované napätie pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	95
B.1	Geometria pohyblivej dosky KM50	96
B.2	Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave . . .	97
B.3	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	97
B.4	Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave . . .	98
B.5	Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave . .	98
B.6	Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave . . .	99
B.7	Znázornenie objemov pohyblivej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO . .	99
B.8	Constrains pohyblivej dosky KM50	100

B.9	Výsledky z topologickej optimalizácie pre pohyblivú dosku KM50 - vľavo <i>MASS 80%</i> , v strede <i>MASS 70%</i> , vpravo <i>MASS 60%</i>	100
B.10	Pôvodná pohyblivá doska KM50 (vľavo) Upravená pohyblivá doska KM50 - CAD model(vpravo)	101
B.11	Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM50 výsledného modelu	102
B.12	Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	102
B.13	Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	103
C.1	Geometria základovej dosky KM50	104
C.2	Okrajové podmienky základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	105
C.3	Redukované napätie základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave	105
C.4	Okrajové podmienky základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave	106
C.5	Redukované napätie základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave	106
C.6	Znázornenie objemov základovej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO	107
C.7	Constrains základovej dosky KM50	107
C.8	Výsledky z topologickej optimalizácie pre základovú dosku KM50 - vľavo <i>MASS 80%</i> , v strede <i>MASS 70%</i> , vpravo <i>MASS 60%</i>	108
C.9	Pôvodná základová doska KM50 (vľavo) Upravená základová doska KM50 -CAD model(vpravo)	108
C.10	Redukované napätie základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu	109
C.11	Redukované napätie základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu	110

Kapitola 1

Úvod

V dnešnej dobe sa používajú rozličné materiály pre rôzne pomôcky a súčiastky. Medzi jedným z novších materiálov, ktorý je stále na vzostupe, je aj plast. S plastovým materiálom je spojené aj spracovanie a výroba komponentov. Vstrekolis je jeden zo strojov, pomocou ktorého je možné vytvárať rôzne plastové komponenty.

Táto práca vznikla na základe spolupráce s firmou KraussMaffei Technologies. Spoločnosť KraussMaffei Technologies je celosvetová firma pochádzajúca z Nemecka zameraná na konštrukciu a montáž strojov a systémov. Slovenská pobočka v Sučanoch - Martine vyrába vstrekovacie strojné zariadenia, diely do strojov spracujúce plasty a elektrické rozvádzače. Vznik spoločnosti na Slovensku bol v roku 2003. Skupina KraussMaffei má desať výrobných závodov po celom svete. Hlavné sídlo spoločnosti sa od roku 1838 nachádza v Mníchove.[10]

Topologická optimalizácia je metóda ako navrhnuť čo najvhodnejší geometrický tvar telesa alebo zostavy, ak poznáme okrajové podmienky ako sú odobratie a potrebných stupňov voľnosti v priestore, veľkosť a smer pôsobiacich síl a momentov a priradenie materiálových vlastností. V praxi sa najčastejšie využíva na odľahčenie hmotnosti súčasti, tým aj zmenšením celkového objemu a taktiež úspore materiálu pri výrobe. Táto metóda sa využíva hlavne v leteckom a automobilovom priemysle, kedy sa hmotnostná úspora dielov dlhodobo prejaví na úspore paliva. V poslednom čase je táto metóda využívaná aj v iných oblastiach priemyslu.[18]

Diplomová práca sa zaoberá topologickou optimalizáciou pohyblivej, pevnej a základovej dosky elektromechanického vstrekolisu. Tieto platne sú súčasťou uzatváracej jednotky, ktorá má za úlohu otvárať a zatvárať formy lisu. Konkrétne sa bude táto diplomová práca zaoberať platňami zo vstrekolisu z rady s označením PX.

Návrh pozostával z rôznych požiadaviek ako napr. deformácia v smere sily, veľkosti maximálneho redukovaného napätia alebo odobratie materiálu v rôznych krokoch odobratia materiálu. S tým súviseli aj jednotlivé medzné stavy(MS). Najdôležitejším MS bol MS deformácie.

Deformačne napäťová analýza ako aj topologická optimalizácia sa prevádzala pomocou metódy konečných prvkov(MKP) v programe Ansys Workbench.

Kapitola 2

Popis problémovej situácie

Plasty sa stávajú čoraz väčšou neodmysliteľnou súčasťou života. Využívajú sa každodenne a takmer pri každej situácii. Jedným z prostriedkov na výrobu plastových súčastí je vstrekolis. Dosky(platne) v uzatváracej jednotke vstrekovacích lisov musia byť dostatočne pevné, aby dokázali preniesť sily pri uzatváraní formy resp.vstrekovaní plastického materiálu. Zároveň musia byť aj tuhé, aby dve časti formy dosadli presne do seba a tým daný výrobok dosahoval potrebných kvalít. Z tohto dôvodu dosahujú tieto časti uzatváracej jednotky, ktorá je súčasťou vstrekolisu, veľkých rozmerov a aj hmotností. Zároveň sa pri výrobe(odlievaní) platní uzatváracej jednotky spotrebuje aj veľa materiálu. Motiváciou práce bolo zníženie hmotnosti platní a zároveň aj ušetrenie materiálu pri odlievaní.

2.1 Formulácia problému

Dosky uzatváracej jednotky sú masívne časti uzatváracej jednotky vstrekolisu, ktoré slúžia na uchytenie formy pre daný plastový výrobok. Tie musia byť dostatočne pevné a tuhé aby preniesli vstrekovacie a lisovacie sily pri výrobe plastovej súčasti. Problémom je nájsť vhodný tvar resp. upraviť geometriu týchto už vyrábaných dosiek s využitím MKP nástroju, ktorým je topologická optimalizácia.

2.2 Ciele práce

Hlavným cieľom diplomovej práce je vytvoriť návrh geometrie platní(dosiek) s využitím topologickej optimalizácie. Tento návrh musí spĺňať určené požiadavky. Je nutné, aby pevné a pohyblivé platne v smere pôsobenia sily dosahovali deformácií maximálne 0,15 mm/m vo vodorovnom a zvislom smere a v diagonálnom smere nemohli deformácie prekročiť hodnotu 0,25mm/m. Ďalšou podmienkou bola maximálna hodnota redukovaného napätia, ktorá u všetkých dosiek nepresiahla hodnotu 145 MPa. Zároveň aj určiť výsledky topologickej optimalizácie vo viacerých stupňoch odobratia materiálu.

Pritom je potrebné vytvoriť výpočtový model dosiek vstrekolisu pre veľkosť vstrekolisu KM50 a KM200 z rady PX. (Pozn. Číselné označenie vstrekolisov určuje maximálnu veľkosť uzatváracej sily vstrekolisu v tonách).

Je nutné zhodnotiť možnosť záťažných stavov a posudzovaných medzných stavov(MS).

Ďalším z cieľov je vytvoriť stručný prehľad možností využitia topologickej optimalizácie ako aj posúdiť prínos topologickej optimalizácie pri návrhu strojných súčastí. V poslednom rade je nutné vykonať D-N analýzu výsledného návrhu dosiek.

2.3 Systém podstatných veličín

Okolie objektu

- vstrekovacia jednotka
- základový stôl, na ktorý sa dosky upínajú priamo v prípade pevnej a opornej dosky, a v prípade pohyblivej dosky cez koľajničky
- vodiace stĺpy(tyče)
- kĺbový mechanizmus
- zakrytovanie stroja
- forma

Geometria a topológia objektu

- rozmery a tvary jednotlivých dosiek boli dodané firmou KraussMaffei Technologies vo forme CAD modelov

Väzby objektu s okolím

- väzby dosiek s kĺbovým mechanizmom, formou a vodiacimi tyčami
- väzby dosiek so základovým stolom - upevnenie jednotlivých dosiek ako aj celého stroja

Aktivácia objektu

- silový tok medzi doskami - plošné sily, ktoré vznikajú pri lisovaní od kĺbového mechanizmu a prenášajú sa cez vodiace stĺpy a formu
- gravitačná sila jednotlivých dosiek ako aj celého stroja

Ovplyvnenie objektu okolím

- hmotnosť celého stroja sa prenáša pri Transporte celého stroja cez opornú dosku a vstrekovaciu časť, takže táto doska musí byť podrobená kontrole aj takýmto typom zaťaženia
- pri zavesení formy medzi pevnú a pohyblivú dosku sa musí rátať aj s hmotnosťou formy

Vlastnosti objektu

- mechanické vlastnosti materiálu telesa dosiek

Procesy a stavy objektu

- stav jednotlivých entít je možné rozdeliť na stav, kedy sú tieto entity zaťažené uzatváracou silou, to znamená že forma je zatvorená a vyvíja sa v nej tlak, a na stav, kedy je forma otvorená alebo zatvorená, ale nie je vyvíjaný tlak medzi dvomi polovicami formy

Prejavy a správanie objektu

- deformačné a napätové prejavy - zvýšenie deformácie a napätia spôsobené uzatváracou silou od kĺbového mechanizmu

Dôsledky prejavov a správania objektu

- prekročenie MS deformácie má za následok nedostatočné dosadnutie formy a tým nepresnosti výroby v plastovom dieli, ktorý sa pomocou vstrekovania vyrába
- prekročenie kritickej hodnoty napätia - mohlo by dôjsť k cyklickému porušovaniu

2.4 Voľba metódy riešenia

Ako najvhodnejšia metóda riešenia je k dispozícii metóda konečných prvkov (MKP), z dôvodu, že topologická optimalizácia je forma optimalizácie, kde sa “vyhryzáva” materiál a preto vyžaduje diskretizáciu objemu na elementy.

Výpočetný systém MKP je zvolený softvér ANSYS konkrétne verzia 19.2. Využitý je prostredie Workbench a modul Topology Optimization. Existujú aj ďalšie softvéry využívajúce topologickú optimalizáciu, ktorých príklady je možné nájsť v kapitole 5.1. Softvér ANSYS je zvolený vzhľadom k jeho vyučovaniu na Ústave Mechaniky Telies, Mechatroniky a Biomechaniky (ÚMTMB) a je taktiež využívaný vo firme KraussMaffei Technologies.

Všetky zadávané veličiny sú deterministické vzhľadom na súčasný stav možnosti výpočtovej techniky a možnosti riešenia v softvéri ANSYS

Kapitola 3

Technológia vstrekovania plastov

Aj keď výroba strojných súčastí z plastov sa radí medzi novšie metódy, počiatky vstrekovania plastov siahajú až do roku 1870, kedy v USA bol patentovaný materiál, z ktorého neskôr vznikol celuoid. Tento patent obsahoval aj zariadenie na vstrekovanie patentovaného materiálu. Z dnešného pohľadu sa vstrekovanie plastov najviac rozšírilo v päťdesiatych rokoch minulého storočia, kedy bola vyrobená prvá šneková vstrekovacia jednotka. V sedemdesiatych rokoch 20. storočia bola vytvorená spätná regulácia na riadenie vstrekovacieho stroja. Prvé automatizované vstrekovacie pracovisko bolo predstavené až v roku 1983. Toto pracovisko bolo avšak málo efektívne a veľmi drahé.[22]

Princíp výroby spočíva vo vstreknutí roztavenej plastickej hmoty, najčastejšie plastového granulátu, do dutiny dvojdielnej formy, ktorá je v čase vstreknutia uzatvorená a po dostatočnom vychladnutí sa forma otvorí a plastový výrobok sa vytlačí pomocou tzv. vyhadzovačov von z formy. Celkový výrobok a jeho kvalita závisí na kvalite plastového materiálu, ale aj na materiálu celej formy, designu, technologickým spracovaním povrchov dutín formy (najčastejšie leštením), tvrdosťou povrchu formy, ktorý je v styku s plastovým dielom, ale aj celkovou konštrukciou formy, do ktorej spadá aj obvod chladiacich kanálov a iné. Pomocou tejto technológie je možné vyrábať rozličné tvary plastovej súčiastky s veľmi úzkymi toleranciami.

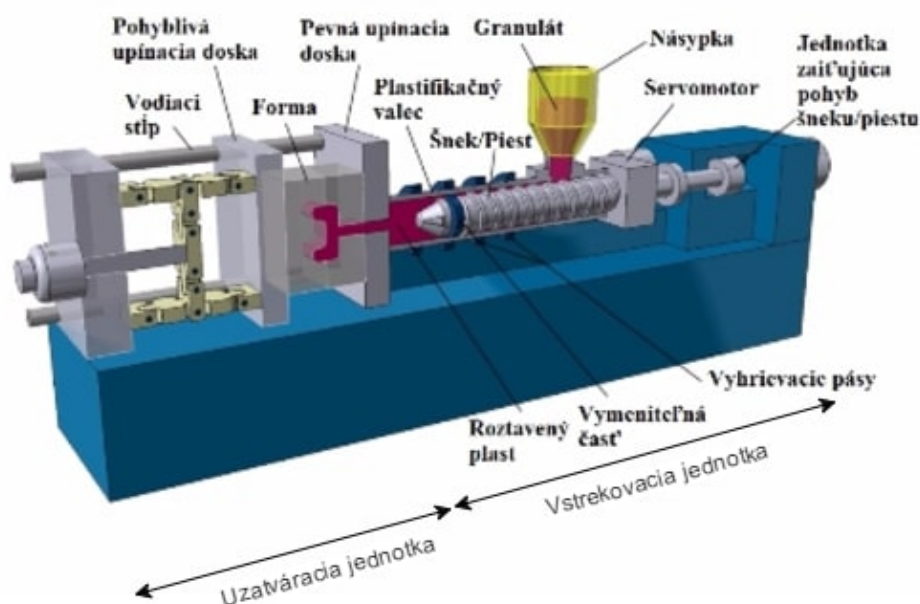
Vstrekovanie plastov je technológia výroby plastových komponentov hlavne pre veľkosériovú výrobu, ktorá je charakteristická krátkymi výrobnými časmi a priaznivou cenou za výrobok. Využíva sa hlavne pre automobilový a elektronický priemysel.[6],[16]

3.1 Vstrekovacie stroje

Vstrekovacie zariadenie funguje väčšinou plne automaticky a tak dosahuje vysokej efektivity práce. Počiatočné náklady na kúpu takéhoto stroja sú príliš vysoké. Taktiež je potrebná aj forma na výrobu súčastí. Preto je táto technológia vhodná pre veľkosériovú výrobu. Vstrekolis sa skladá z uzatváracej jednotky, vstrekovacej jednotky, formy, z riadiaceho a regulačného zariadenia vid' Obr. č. 3.1. K automatizovanému pracovisku vstrekolisú sa často dodávajú ďalšie komponenty ako manipulátory, roboty, temperačné zariadenia, dávkovacie a miešacie zariadenie, sušičky, dopravníky, mlyny atď. [5]

Vstrekovacie stroje je možné rozdeliť podľa viacerých kritérií:

- podľa pohonu zaisťujúci pohyb v hlavných osiach stroja (pohyb vstrekovacej a uzatváracej jednotky):



Obr. 3.1: Popis vstrekolisu [16]

- hydraulické stroje - pohyby sú poháňané olejom, účinnosť závisí na kvalite maziva a typu oleja, najuniverzálnejšie
- elektrické stroje - sú poháňané servopohonmi a každá časť má svoj servopohon, čo zaručuje nezávislosť jednotlivých častí. Servopohony spolu s klbovým mechanizmom dodávajú vysokú účinnosť a vďaka závitovým prevodom sú jednotlivé pohyby veľmi presné
- hybridné stroje - kombinácia predchádzajúcich dvoch typov pohonov. Spojením hydraulického systému a servopohonov je možné znížiť energiu a zvýšiť celkovú účinnosť. Najčastejším variantom je čisto elektricky poháňaná uzatváracia jednotka a hydraulicky poháňaná vstrekovacia časť.[21]
- podľa pracovného člena v taviacej komore vstrekovacej jednotky:
 - piestové stroje
 - šnekové stroje
- podľa smeru posuvu pohyblivej platne uzatváracej jednotky bez ohľadu na pozíciu vstrekovacej jednotky:
 - horizontálne
 - vertikálne
 - uhlové
- podľa typu spracovávaného plastu:
 - stroje spracujúce termoplasty
 - stroje spracujúce reaktoplasty
 - stroje spracujúce kaučuk

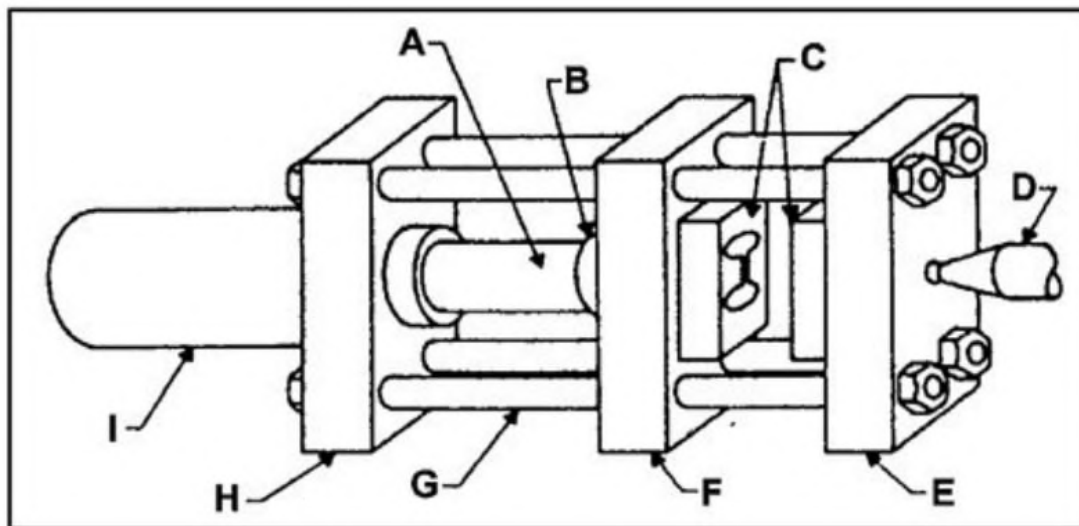
- podľa počtu platní uzatváracej jednotky:
 - dvojplatňové
 - trojplatňové
 - podľa počtu šnekov vo vstrekovacej jednotke
 - jednošnekové
 - viacšnekové
 - podľa rýchlosti otáčok šneku
 - rýchlobežné
 - pomalobežné
 - podľa použitia predplastifikácie vo vstrekovacej jednotke
 - bez predplastifikácie
 - s predplastifikáciou
 - podľa počtu vodiacich tyčí uzatváracej jednotky
 - bez vodiacich tyčí
 - s dvoma vodiacími tyčami
 - so štyrmi vodiacími tyčami
 - podľa maximálnej sily uzatváracej jednotky
 - malé vstrekolisy - do 500kN = do 50 ton
 - stredné vstrekolisy - 500 - 5000kN = 50 - 500 ton
 - veľké vstrekolisy - nad 5000 kN = nad 500 ton
- Pozn. v praxi sa často používa označenie v tonách.[19]

3.1.1 Uzatváracia jednotka

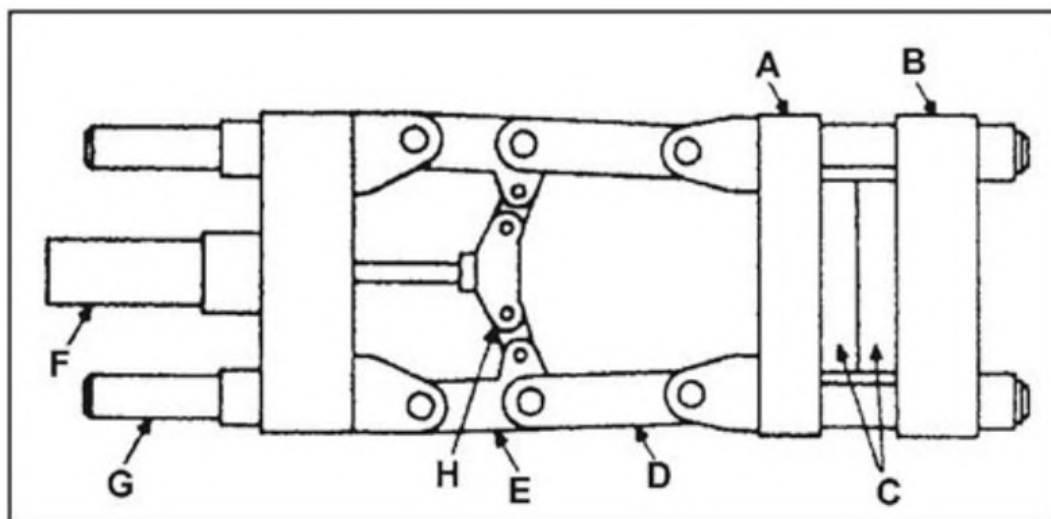
Uzatváracia jednotka slúži na otváranie a zatváranie jednotlivých polovic formy a na udržanie uzatvorenej formy počas vstreknutia plastickej taveniny. Sila potrebná na to je veľmi veľká. Dôvodom sú vysoké vstrekovacie tlaky, vďaka ktorým je plastický materiál riadne dotlačený do celej formy a taktiež zvyšujú viskozitu vstrekovanej hmoty. To znamená, že uzatváracia jednotka je navrhnutá veľmi masívne, čo na druhej strane spôsobuje problémy pri otváraní a zatváraní formy, keďže sa vyžaduje čo najrýchlejšie otváranie a zatváranie kvôli zníženiu nákladov a taktiež strojného času pri výrobe plastovej súčiastky.[14]

Táto časť vstrekolisu je zložená z vodiacich stĺpov, z pevnej platne, pohyblivej platne, podľa typu konštrukcie aj zo základovej resp.opornej platne, formy, ktorej jednotlivé polovice sú uchytené na pevnej a pohyblivej platni, a mechanizmu , ktorý je zdrojom sily na otváranie a zatváranie formy a udržanie formy uzavretej v čase vstreknutia hmoty a dotlaku. Podľa druhu pohybu môžeme rozdeliť uzatváraciu jednotku resp. mechanizmus, ktorý je zdrojom uzatváracích síl na hydraulickú, mechanickú a kombinovanú. V hydraulickej uzatváracej jednotke je hlavným zdrojom hydraulický piest, ktorý môže byť napojený priamo na pohyblivú platňu viď Obr. č. 3.2 alebo na klbový mechanizmus viď Obr.č. 3.3.

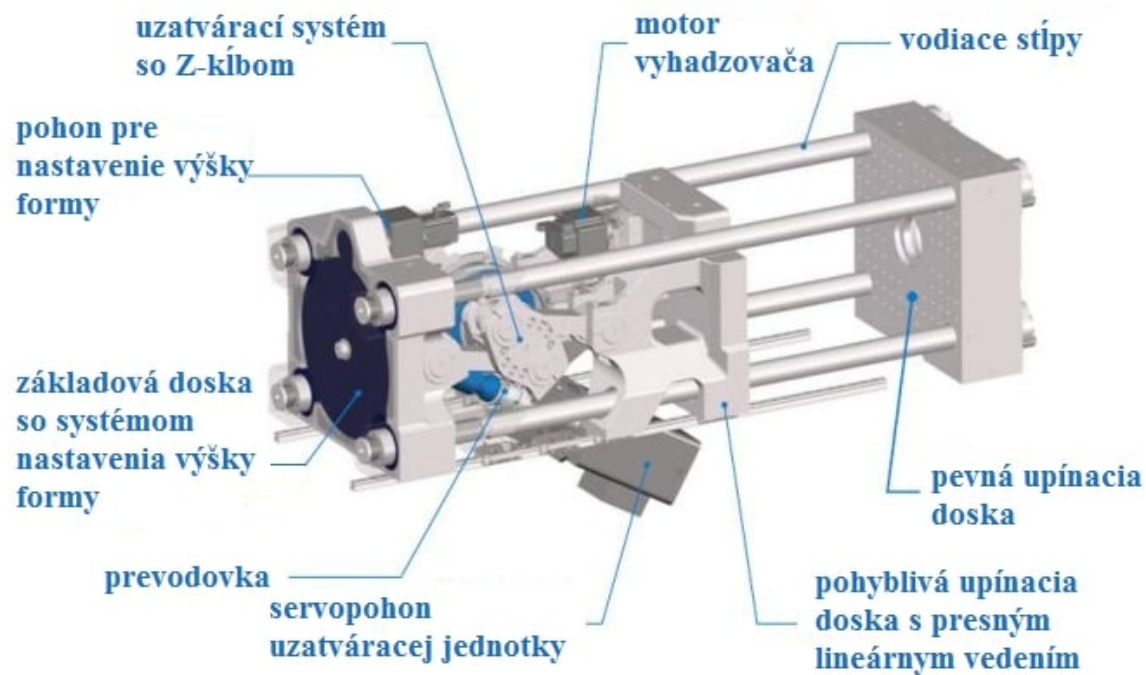
Mechanická uzat.jednotka obsahuje najčastejšie kľbový mechanizmus, ktorý je poháňaný elektromotormi viď Obr. č. 3.4 alebo pomocou servopohonov s guľčikovými skrutkami viď Obr. č. 3.5 [19].



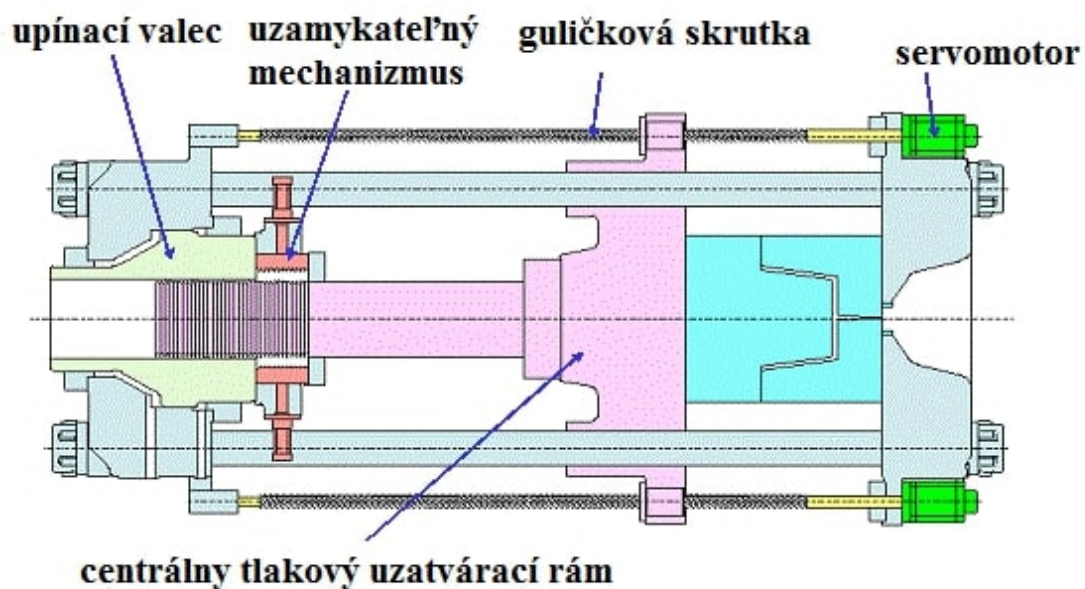
Obr. 3.2: Hydraulická uzatváracia jednotka s hydraulickým valcom napojeným priamo na pohyblivú dosku [14] A: ovládací piest, B: odnímateľný medzerník, C: Forma, D: vstreko-
vacia tryska, E: pevná upínacia doska, F: pohyblivá upínacia doska, G: vodiaci stĺp, H:
základová(oporná) doska valca, I: upínací hydraulický valec



Obr. 3.3: Hydraulická uzatváracia jednotka s kľbovým mechanizmom [14] A: pohyblivá
upínacia doska, B: pevná upínacia doska, C: forma, D: predný spoj kľbového mechanizmu,
E: zadný spoj kľbového mechanizmu, F: ovládací(hydraulický) valec, G: vodiaci stĺp, H:
krížny spoj kľbového mechanizmu



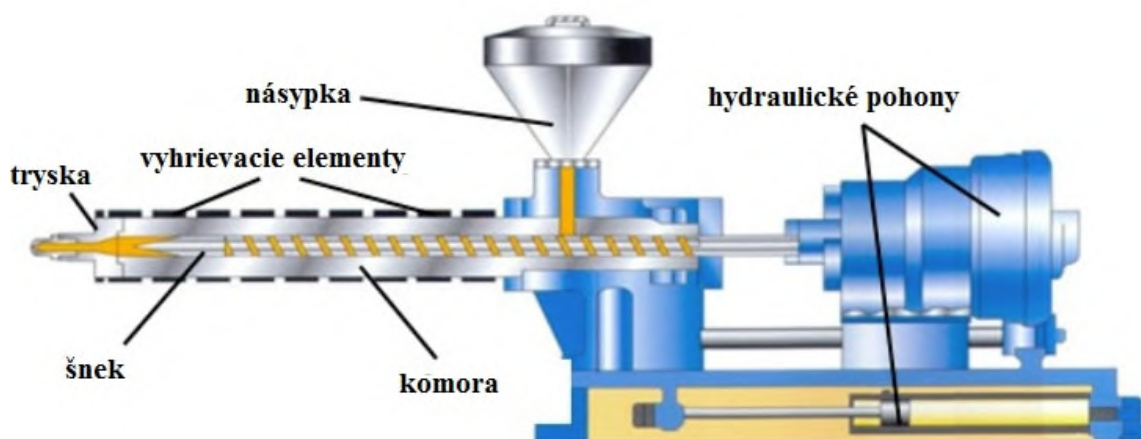
Obr. 3.4: Elektrická uzatváracia jednotka s kĺbovým mechanizmom rady EX od firmy KraussMaffei [2]



Obr. 3.5: Elektrická uzatváracia jednotka s guličkovými skrutkami [16]

3.1.2 Vstrekovacia jednotka

Hlavnou funkciou vstrekovacej jednotky je roztavenie tuhého plastového materiálu vo forme granulátu do vysoko viskózneho stavu. Následne je táto tavenina presúvaná až do tvarovej dutiny formy. Existujú dva typy vstrekovacích jednotiek. Piestové vstrekovacie jednotky používajú na prenos roztaveného plastu piest s hydraulickým pohonom. V súčasnosti sa takéto vstrekovacie jednotky nevyužívajú z dôvodu nízkej účinnosti. Druhým typom vstrekovacej jednotky je šneková vstrekovacia jednotka. Pohyb je založený na otáčaní šneku, ktorý rotuje okolo vlastnej osi a axiálne sa pohybuje vpred a vzad. Posuvné konzoly na vstrekovacej jednotke slúžia na prísun resp. odsun celej vstrekovacej jednotky a udržanie vstrekovacieho tlaku cez trysku počas vstreku aj dotlaku. Čo sa týka roztopenia plastického granulátu, až 70% tepelnej energie je dodávaná trením a otáčkami šneku. Konštrukcia celej vstrekovacej jednotky, taviacej komory ako aj typ šneku sú závislé na type materiálu, ktorý bude vstrekovacia jednotka roztavovať. Hlavnými parametrami na výkonnosť vstrekovacej jednotky sú vstrekovacia kapacita maximálneho objemu taveniny udávaná v $[cm^3]$ a plastifikačná kapacita maximálneho množstva taveniny za jednotku času, ktorá sa udáva v $[kg \cdot hod^{-1}]$. [19]



Obr. 3.6: Šneková vstrekovacia jednotka [19]

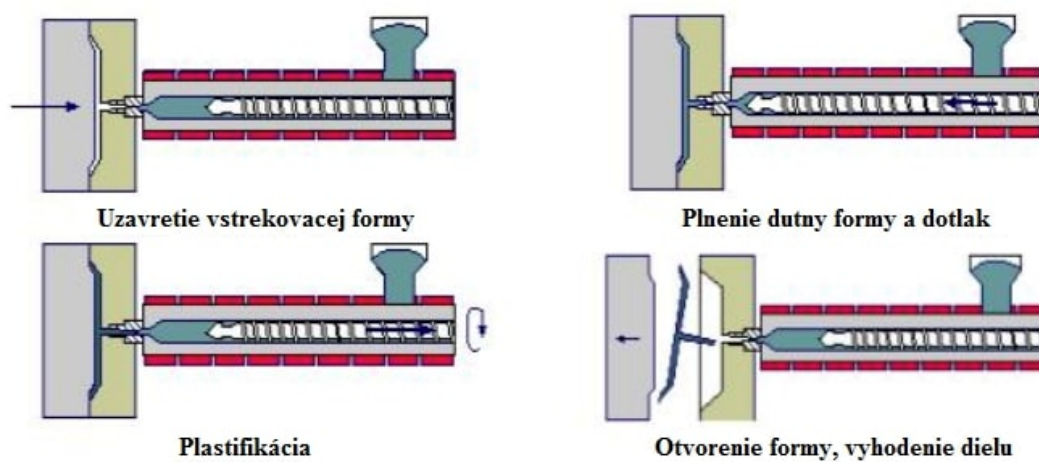
3.1.3 Proces vstrekovacích strojov

Výrobný cyklus sa skladá z viacerých procesov, či už sa odohrávajú vo vnútri formy alebo ho vykonáva samotný vstrekolis. Vstrekovací cyklus je výsledná sekvencia týchto procesov a jeho čas určuje dobu, ktorá je potrebná na výrobu jedného výrobku. [19]

Vstrekovací cyklus sa dá rozdeliť do 9 častí:

1. Uzatváranie formy a vyvolanie uzatváracej sily
2. Prísun vstrekovacej jednotky k forme a vyvolanie prítlaku
3. Vstrekovanie - skladá sa z plnenia dutiny a z kompresnej časti
4. Prepnutie na dotlak
5. Dotlaková fáza

6. Fáza chladnutia a dávkovania - u konvenčných strojov prebiehajú tieto fázy spoločne
7. Odsunutie vstrekovacej jednotky
8. Otvorenie formy
9. Vyhodenie alebo vybratie plastového výrobku z formy [21]



Obr. 3.7: Schéma vstrekovacieho cyklu [5]

Kapitola 4

Metódy optimalizácie topológie

Jednou z oblastí výpočtovej mechaniky je aj optimalizácia topológie, ktorá sa usiluje násobne väčšie ušetrenie materiálu ako optimalizácia len jedného parametra prierezu alebo tvaru. Optimalizáciu topologie je možné rozdeliť na dve časti.

Prvou je optimalizácia dispozície (Layout Optimization - LO), kde sa optimalizácia sústreďí na prúťové a rámové konštrukcie. Tieto konštrukcie sa vyznačujú veľmi malým objemom v porovnaní s návrhovou oblasťou. Neskôr sa tento typ optimalizácie rozvinul aj pre roštové konštrukcie.

Druhou časťou je zovšeobecnená optimalizácia tvaru (Generalized Shape Optimization - GSO), ktorá sa sústreďí na konštrukcie a súčastí veľkých objemov. Tu dochádza k návrhu tvaru ale aj topologie. Tieto problémy alebo úlohy sa riešia najčastejšie s využitím metódy konečných prvkov - MKP. Len sporadicky sa riešia takéto úlohy analyticky.

4.1 Metódy zovšeobecnenej optimalizácie tvaru s využitím MKP

Tieto metódy je možné rozdeliť pomocou používaných elementov:

- Izotropný pevný alebo prázdny element (Isotropic Solid or Empty element - **ISE**)
- Anizotropný pevný alebo prázdny element (Anisotropic Solid or Empty element - **ASE**)
- Izotropný pevný, prázdny alebo pórovitý element (Isotropic Solid, Empty or Porous element - **ISEP**),

kde pevným elementom sa nazýva element celý vyplnený jedným materiálom, prázdny element neobsahuje žiadny materiál a pórovitý element je tvorený jedným materiálom s prázdny priestorom (void cavities).

Najpoužívanejšie metódy zovšeobecnej optimalizácie tvaru sú metódy s využitím Izotropných pevných alebo prázdnych elementov (tzv. ISE-topológie). Existujú tri základné výpočetné stratégie ISE-topológií:

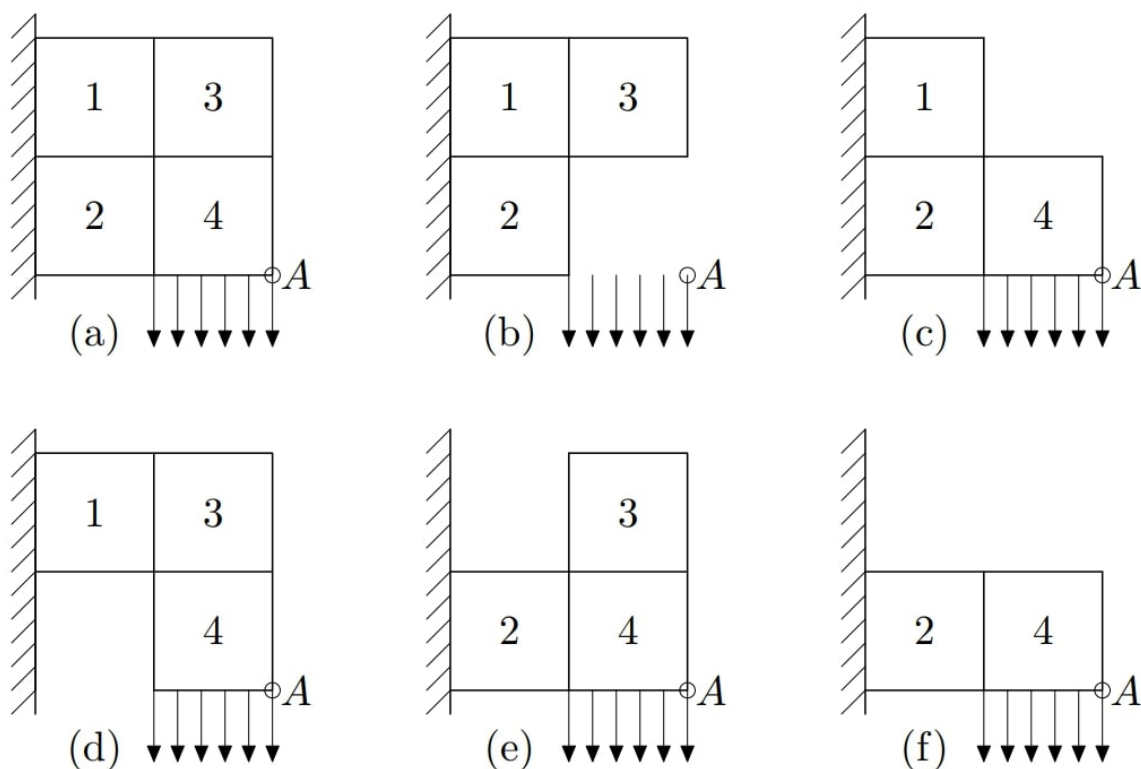
- metóda pevnej izotropnej mikroštruktúry s penalizáciou (Solid Isotropic Microstructure with Penalization - **SIMP**)
- metóda optimálnej mikroštruktúry s penalizáciou (Optimal Microstructure with Penalization - **OMP**)

- metóda neoptimálnych mikroštruktúr (NonOptimal Microstructures - **NOM**),

Tieto 3 metódy je možné využívať cez dva prístupy a to s pevne danou sieťou elementov alebo voľnou sieťou, čo znamená tvorbu siete v priebehu optimalizácie. Ďalej sa budú uvažovať metódy s prístupom s pevne danou sieťou.

4.1.1 Topológie tvorené izotropnými pevnými alebo prázdnyimi elementami - ISE-topológie

Typickým príkladom ako fungujú metódy ISE môže byť jednostranne votknutý 4-prvkový priestor pre 1ISE-topológiu (číslica 1 znamená, že tento priestor je zložený len z 1 materiálu), kde sa využije tzv. čierna a biela topológia (black and white topology). Čiernej sa priradzuje hodnota 1 - musí tam prvok ostať a bielej hodnota 0, kde je tento prvok nepotrebný. V tomto prípade je považované aby zvislý posuv v bode A bol minimálny a objemový zlomok nemôže presiahnuť 75%. Keďže tento priestor je zložený len zo 4 prvkov, podmienkou je odstránenie aspoň jedného prvku viď Obr. č. 4.1.



Obr. 4.1: ISE-topológia: (a) návrhová oblasť pokrytá MKP sieťou, (b) neprípustné riešenie, (c) optimálne riešenie, (d-f) prípustné avšak nie optimálne riešenie [17]

Metódy SIMP,OMP a NOM je možné použiť v spojení s využitím metódy kritéria optimality (Optimality Criterium - OC) alebo matematického programovania - MP.

Metóda SIMP

Táto metóda bola odvodená pre dosku, kde tuhosť dosky v $3D$ závisí lineárne na hrúbke dosky t_0 alebo v prípade $2D$ je táto hrúbka nulová, dostávame 2^N návrhových možností,

kde N je počet elementov. Jedným z riešení ako zrýchliť túto metódu je uvažovať spojitú lineárne sa meniacu hrúbku dosky $t \in (0; t_0)$. Avšak problém je v tom, že v ISE-topológiách je možné brať do úvahy len hrúbky t_0 alebo 0 a prítomnosť medzilahlých hodnôt je možné penalizovať. Tieto medzilahlé hodnoty sa penalizujú pomocou špecifickej hrúbky (hustoty) ϱ , kde

$$t = \varrho^p \quad (4.1)$$

a $p > 1$.

Táto penalizácia potlačí medzilahlé hodnoty hrúbky, ale úloha sa stane nelineárná a nekonvexná. Preto je potrebné začať výpočet s hodnotou $p = 1$ a postupne túto hodnotu zvyšovať až na doporučovaných 5.

Výhody metódy

- výpočetná efektivita - na jeden element pripadá iba jedna návrhová premenná
- univerzálnosť - môže byť použitá pre ľubovoľnú kombináciu vedľajších podmienok
- penalizáciu je možné implementovať nezávisle na charaktere vlastnej úlohy
- teoretická jednoduchosť - algoritmus nezahrňuje vyššiu matematiku
- ak začína výpočet hodnotou $p = 1$, potom je táto úloha konvexná a lokálne minimum je zároveň globálnym minimom a v nasledujúcom zvýšení parametru p sa nepredpokladajú radikálne zmeny
- nevyžaduje homogenizáciu mikroštruktúry

Nevýhody metódy

- závislosť riešenia na stupni penalizácie a neistota konvergenzie ku skutočnému optimálnemu bodu (týmto problémom však trpia aj ostatné metódy k hľadaniu optimálnej ISE-topológie)
- z počiatku bola táto metóda závislá na jemnosti MKP siete - odstránenie pomocou vedľajšej podmienky na dĺžku vnútorných hraníc alebo na veľkosť priemeru vnútorných dutín. Pre každú hodnotu minimálneho povoleného priemeru existuje kritická hustota siete, kedy sa optimálna ISE-topológia nemení
- táto metóda je diskrétna a nemá priamy vzťah s reálnou spojitou podmienenosťou spojitej úlohy, preto je potrebné aby diskrétna úloha bola dobre podmienená, čo znamená, že musí mať aspoň jedno riešenie.

Metóda SIMP bola prvýkrát popísaná v roku 1989. Ak sa však úloha redukuje len na penalizáciu $p = 1$, metóda SIMP sa redukuje na optimalizáciu plošných oblúkov premennej hrúbky, ktorá bola známa už v roku 1973. V roku 1991 bola metóda SIMP spojená s metódou spojitého kritéria optimality (Continuum-type Optimality Criteria method - **COC**). V roku 1992 sa zefektívnil prístup cez maticovú podobu pre diskretizovaný model (Discretized COC - **DCOC**). Využíva sa k riešeniu obsahujúce rôzne ciele a vedľajšie podmienky ako napr. násobné zaťažujúce podmienky kombinovanú napätosť, posuvy, stabilita, vlastné frekvencie, elastické uloženie, teplotné deformácie, predpätie.

Metóda OMP

Metóda hľadá riešenie celej úlohy pri použití konečných prvkov, ktoré majú optimálnu mikroštruktúru. Táto optimálna mikroštruktúra je hľadaná analyticky. V súčasnosti je toto riešenie známe pre úlohy len s minimálnou alebo maximálnou tuhosťou, kde je avšak tuhosť vo vedľajších podmienkach. Optimálna mikroštruktúra má pre $2D$ tri voľné parametre a pre $3D$ päť voľných parametrov.

Výhody metódy

- súčasné získanie riešenia pre topológiu ISE aj ISEP

Nevýhody metódy

- viac návrhových parametrov - nižšia výpočtová efektivita
- optimálna mikroštruktúra všeobecnej úlohy nie je známa - len extremalizácia tuhostí
- určenie optimálnej mikroštruktúry pre nové podmienky vyžaduje vyššiu matematiku
- vedie k nekonvexnej úlohe
- vyžaduje homogenizáciu mikroštruktúry
- závisí na stupni penalizácie
- neistá konvergencia

Rozdiel medzi SIMP a OMP

OMP metódu využívajú častejšie matematici. Je síce náročnejšia, avšak riešenie je korektnejšie. SIMP metódu využívajú častejšie fyzici, mechanici a technici. Ak však je v metóde SIMP použitá vhodná penalizácia, riešenie je korektné častokrát ešte korektnejšie ako riešenie pomocou OMP metódy.

Metóda NOM

Používa zvolené mikroštruktúry, ktoré nemusia byť optimálne ako napr. elementy so štvorcovým otvorom. Táto metóda nemusí využívať penalizáciu.

Výhody metódy

- počet neznámych parametrov je menší ako v OMP metóde.

Nevýhody metódy

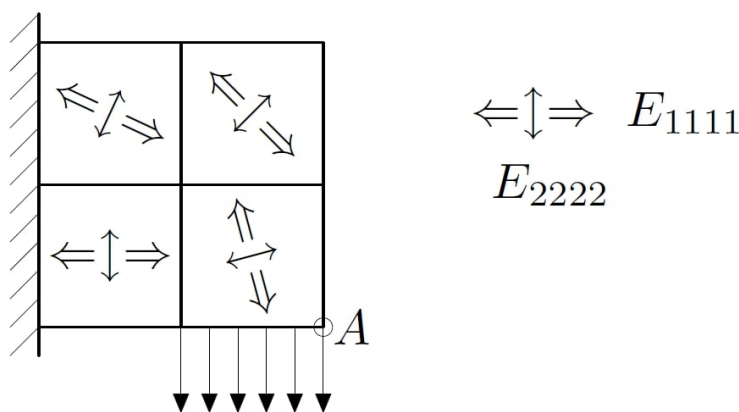
- zahrňuje viac návrhových parametrov k jednému elementu ako metóda SIMP
- penalizácia obvykle nedokáže potlačiť “šedé” zóny $t \in (0, t_0)$ - nedá sa teda rozprávať o ISE-topológiach
- nekonvexná formalizácia uvažovanej úlohy
- vyžaduje homogenizáciu mikroštruktúry

Ďalšie metódy

- Metóda DDP (Dual Discrete Programming)
- Evolučná konštrukčná optimalizácia (Evolutionary Structural Optimization - ESO)
- Aditívny biologický rast (Adaptive Biological Growth - ABG)
- Postupné zavrhnutie a prijatie elementov (Sequential Element Rejections and Admissions method - SERA)

4.1.2 Topológie tvorené anizotropnými pevnými alebo prázdnymi elementami - ASE-topológia

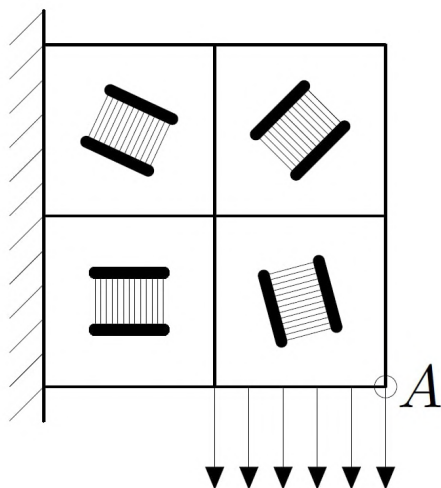
Tieto topológie sú tvorené anizotropnými pevnými alebo prázdnymi elementami. Každý element má vlastné mechanické vlastnosti špecifikované tenzorom tuhosti $E = E_{ijkl}$, ktoré sú v rámci celého elementu konštantné avšak všeobecne vzájomne odlišné.



Obr. 4.2: ASE-topológia [17]

4.1.3 Topológie tvorené izotropnými pevnými, prázdnymi alebo pórovitými elementami - ISEP, ISEC, ISECP-topológie

V týchto topológiach sa nachádzajú elementy, ktoré obsahujú prázdny priestor. Tieto prvky môžu mať len jeden alebo viac izotropných materiálov. Každý element tak predstavuje kompozitnú (pórovitú) štruktúru, ktorú je možno optimalizovať samostatne. Uskutočňuje sa pomocou homogenizácie heterogénneho materiálu. Algoritmus spočíva priemerovaním vlastností cez objem elementu (Isotropic base material; Solid, Empty, Porous elements - ISEP). Homogenizácia prechádza z ISEP-topológie na topológiu ASE, čo je z výpočtového hľadiska výhodné.



Obr. 4.3: ISEP-topológia tvorená mikrolaminátmi druhého rádu [17]

ISEC-topológie sú topológie podobné k ISEP, kde pórovité elementy sú nahradené elementami kompozitnými. ISECP-topológie pripúšťajú elementy kompozitné ako aj pórovité [17]

Kapitola 5

Topologická optimalizácia

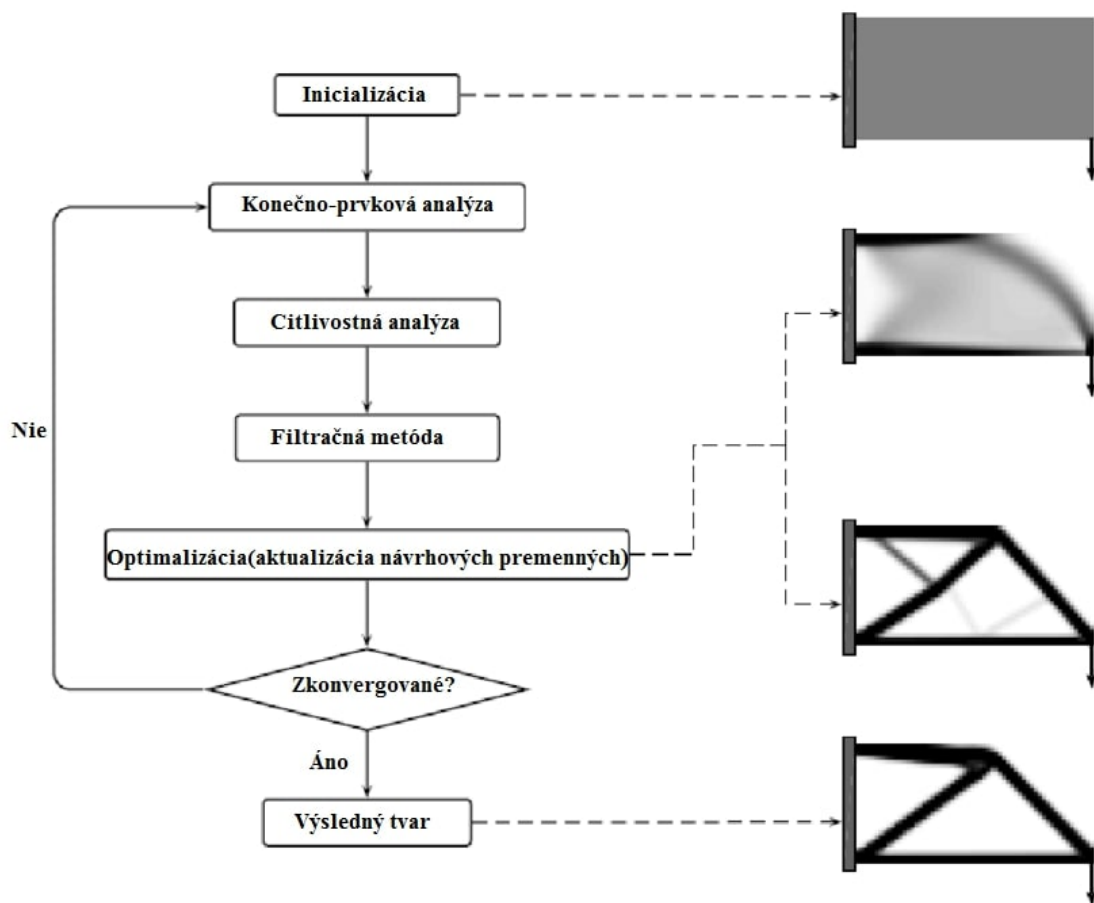
Topologická optimalizácia (TO) je špeciálna forma tvarovej optimalizácie. Optimálny návrh konštrukcie je veľmi zložitý a častokrát nadbytočné množstvo materiálu nie je potrebné pre dané zaťaženie. TO umožňuje upraviť tvar tak, aby konštrukcia prenášala sily čo najefektívnejšie, pri čo najlepšom využití materiálu. Nižšia hmotnosť strojných komponentov má pozitívny vplyv na pohybujúce sa časti stroja, zvýšenie energetickej účinnosti a zníženie prepravných nákladov.

Existujú tri hlavné dôvody, prečo je potrebné vykonať TO. Prvý dôvod je maximalizácia statickej tuhosti pri obmedzenom objeme, čo znamená najlepšie rozmiestnenie objemu materiálu pri maximalizácii tuhosti. Druhým dôvodom je minimalizácia objemu pri obmedzenej statickej tuhosti. Je to presný opak prvej podmienky, kde sa minimalizuje objem východzieho materiálu pri vyhovovanej zadanej podmienky statickej tuhosti. Posledným dôvodom využitia topologickej optimalizácie je maximalizácia dynamickej tuhosti pri obmedzenom objeme, čo znamená, že pri zvolenej vlastnej frekvencii kmitania stroja alebo súčasti je hľadaná maximálna tuhosť pri zadanom stupni redukcie objemu materiálu.

Ak sa niekto zaoberá konštrukciou určitého výrobku už dlhšiu dobu, je možné, že takýto konštruktér dokáže navrhnúť konštrukciu možno ešte efektívnejšie ako je výsledok z TO. TO sa najčastejšie využíva, keď je potrebné zistiť geometriu nejakého nového výrobku a táto geometria nie je vopred známa. V dnešnej dobe, keď sa veľmi často využívajú 3D tlačiarne, je pomocou nich možno konštruovať rôzne tvary konštrukcie a prakticky čokoľvek. [7],[20],[15]

5.1 Programy využívajúce Topologickú optimalizáciu

- **ANSYS** - viac informácií v kapitole 6
- **Altair Inspire** - je ľahko použiteľným dizajnerským programom, v ktorom je pomocou simulácie topologickej optimalizácie rýchlym riešením pre konštruktérov. Ponúka množstvo možností nastavenia Topologickej optimalizácie ako nastavenie objektívnej funkcie na maximálnu tuhosť alebo minimálnu hmotnosť. Zároveň umožňuje pomocou funkcie Shape Design vybrať výrobné možnosti vyňatia materiálu napr. Extrusion - Vysunutie. Je možné zadať rôzne deformačné a okrajové podmienky, zrýchlenia, gravitáciu, teplotné okrajové podmienky a iné. [11]
- **Pareto** - je program od spoločnosti SciArt, ktorý umožňuje koncepciu dizajnu v ranom štádiu vývoja. Umožňuje inžinierom dizajnu preskúmať viac konceptov v kratšom



Obr. 5.1: Všeobecná schéma topologickej optimalizácie SIMP metódou [13]

čas a dosiahnuť tvary dizajnu rýchlejšie a lacnejšie. Vo všeobecnosti je však obmedzený na použitie expertmi na simulácie a optimalizácie. Pareto odstraňuje potrebu simulačného experta prostredníctvom jednoduchého 5-stupňového procesu na generovanie koncepcií návrhu.

- Definovanie konštrukčného priestoru
- Definovanie funkcie dizajnu
- Definovanie obmedzení (Design & Manufacturing)
- Definovanie objektívnej funkcie (napr. Minimalizovanie hmotnosti)
- Generovanie konceptu návrhu

Program podporuje taktiež obmedzenia týkajúce sa výroby napr. odlievania, kovania, vytlačania. [8]

- **MSC.Nastran** - je produktová skupina, ktorá umožňuje analyzovať produkty od jednoduchých komponentov až po zložité štruktúry a systémy. MSC.Nastran je využívaný na posúdenie mnohých funkčných aspektov ako sú posuvy, napätia, vibrácie teplota atď. MSC.Nastran Topology optimization je program postavený na metóde

hustoty a matematickom programovaní na riešenie nielen klasických problémov topológie ale všeobecných multidisciplinárnych problémov optimalizácie topológie. Je schopný vytvoriť koncepčný návrh dizajnu, ktorý môže byť použitý ako počiatočný návrh pre dimenzovanie detailov a optimalizáciu tvarov. MSC.Nastran Topology optimization rozširuje proces optimalizácie pomocou optimalizovaného algoritmu BIGDOT na konštrukciu s optimálnym rozložením materiálu vzhľadom na priestor, zaťaženie a okrajové podmienky. Optimalizátor BIGDOT so zlepšeným výkonom oproti optimalizátoru DOT, ktorý sa nachádza v MSC.Nastran Design Optimization, efektívne vypočítava takmer optimálne diskkrétne riešenie pre veľmi rozsiahle problémy s optimalizáciou návrhu s až dvoma miliónmi lineárnych a nelineárnych obmedzených a neobmedzených premenných optimalizácie návrhu. Produktový modul Topology Optimization, ktorý je k dispozícii samostatne alebo v kombinácii s modulom produktu Design Optimization, výrazne zvyšuje schopnosť vykonávať optimalizáciu návrhu. Topologická optimalizácia je definovaná pre 2D alebo 3D priestor a pre všetky elementy odkazujúce sa na izotropný materiál. Je možné ju využívať pre lineárnu statickú analýzu, Modálnu analýzu (Normal Modes), ale napr. pre Buckling. Obsahuje aj výrobné funkcie ako napr. Minimum Member Size. MSC.Patran je program, v ktorom je možné upravovať výsledný topologický návrh. z MSC. Nastran Topology optimization. [3]

- **Topostruct** - je softvér na optimalizáciu topológie určený pre návrhárov a architektov. Užívateľ musí zadať iba rozmery celkového objemu, cieľový zlomok využitia materiálu, ktorý sa má dosiahnuť, ako aj zaťaženia a deformačné okrajové podmienky. Tento softvér podporuje systémy v 2D aj 3D, ako aj množstvo spôsobov vizualizácie výsledkov statickej analýzy, aby bol proces vývoja pre inžinierov intuitívny. [1]
- **Abaqus Topology Optimization Module (ATOM)** - je modul programu Abaqus od firmy Simulia, ktorý využíva nelineárny riešič Abaqus/Standard. Poskytuje užívateľom možnosť výberu objektívnych funkcií a obmedzení. Je možné zvoliť si objektívnu funkciu objemu, hmotnosti, Compliance, posuvov, reakčných síl, rotácie, vlastných frekvencií, akustických veličín, atď. V ATOM je taktiež možnosť nastavenia výrobných nastavení z hľadiska odlievania a kovania, rôzne tvary symetrií ako rotačná, cyklická, rovinná, ale aj obmedzenia veľkosti materiálu ako minimálna alebo maximálna veľkosť dutín, ale aj veľkosť obálky pre hrúbku steny. Z hľadiska obmedzení je možnosť nastaviť hodnoty ekvivalentného napätia, optimalizácia tvaru kontaktných plôch pre homogénne kontaktné napätie, maximalizácia vybraných vlastných frekvencií, špecifikácia objemového obmedzenia, ďalšie výrobné obmedzenia nezávislé od siete na odlievanie, lisovanie, vytlačanie a vrtanie, kontrola prieniku susedných častí (Penetrácia). Taktiež je možnosť vyhladzovania siete v každom cykle návrhu, ktoré zaisťuje optimalizácia stability riešenia. V tomto module je tiež možnosť tvarovej optimalizácie (Shape Optimization), kde sa minimalizujú koncentrácie napätia pomocou výsledkov analýzy napätia a modifikuje sa povrchová geometria komponentu, až kým sa nedosiahne požadovaná hodnota napätia.

Prednastavenie geometrie ako aj výsledná úprava geometrie po topologickej optimalizácii je možné vykonať v Abaqus/CAE. Výsledný tvar geometrie je možný vyexportovať v neutrálnom type súboru STL ale aj v type súboru INP, ktorý sa môže využiť pri parametrizácii geometrie.[4]

- **Z88Arion** - je súčasť MKP softvéru Z88, ktorý vznikol na Univerzite v nemeckom Bayreuth-e. Jedná sa o voľne stiahnuteľný softvérový projekt. Momentálna verzia po-

núka tri odlišné postupy pre topologickú optimalizáciu. Geometriu je možné nahrať v type súboru STEP alebo STL a využiť rôzne buď voľne stiahnuteľné programy na vysieťovanie alebo tzv. implementovaný lineárne tetraedrický adaptabilný respektívne mapovaný hexaedrický mesher. Z88Arion má databázu 50 preddefinovaných materiálov. Je možné definovať rôzne okrajové podmienky ako sily a posuvy vo všetkých smeroch, čiarové a plošné zaťaženia a tlak v kladnom aj zápornom smere k povrchu. Na výpočet využíva OC metódu (optimalizácia minima Compliance alebo Maximálnej tuhosti), SKO metódu (maximálna stabilita) alebo TOSS metódu (optimalizácia pre minimum poddajnosti s maximálnou stabilitou). Z88Arion je dostupný v nemeckom jazyku. Anglická verzia je vo vývoji. [12]

- atď.

Kapitola 6

Topologická optimalizácia v programe Ansys Topological Optimization

Jedným zo softvéru, ktorá umožňuje vykonávať topologickú optimalizáciu (TO) je Ansys Inc. TO v Ansyse sa zo začiatku dala využiť len cez ACT rozšírenie od verzie 17.1. Ansys aplikoval TO priamo do plug-inu Workbench Mechanical až do verzie 18.0. a to bez nutnosti doinštalovania ďalších rozšírení. V tejto verzii však niektoré staršie funkcie, ktoré boli už naprogramované v ACT rozšírení pre verziu 17.1, chýbali ako napr. funkcia Manufacturing. V následných verziách 18.1 však už tieto možnosti boli doplnené. Výhodou novších verzií je aj stabilnejšie riešenie, to znamená že TO v priebehu iterácií nepadá.

V nasledujúcej kapitole sú rozpísané jednotlivé možnosti nastavenia TO v programe Ansys s vysvetlením niektorých funkcií na modelovom príklade. Treba spomenúť, že tento modelový príklad bol v 3D. Topologická optimalizácia je však schopná optimalizovať aj 2D prvky.

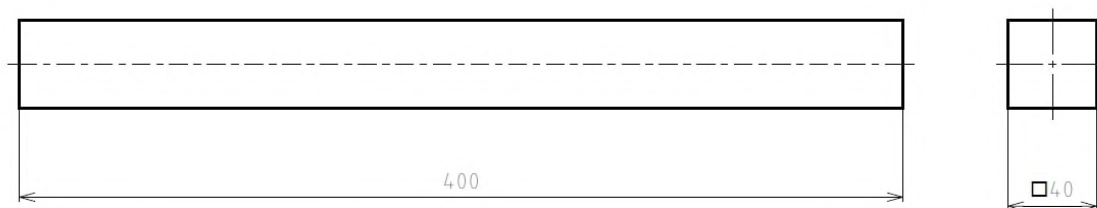
Materiálové charakteristiky a rozmery

$E = 200000 \text{ MPa}$ Youngov modul pružnosti v ťahu

$\mu = 0,3$ Poissonov pomer

$\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ hustota materiálu

$m = 5,204 \text{ kg}$ hmotnosť



Obr. 6.1: Rozmery telesa

Teleso bolo zatažené plošnou silou v ose Y hodnotou -10000 N . Na jeho druhom konci bola na celú plochu predpísaná okrajová podmienka zamedzujúca posuv v smere osi Z , na

symetrickú os telesa rovnobežnú s osou X bol predpísaný nulový posuv v smere osi Y a na symetrickú os telesa rovnobežnú s osou Y bol zas predpísaný nulový posuv v smere osi X .

A: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

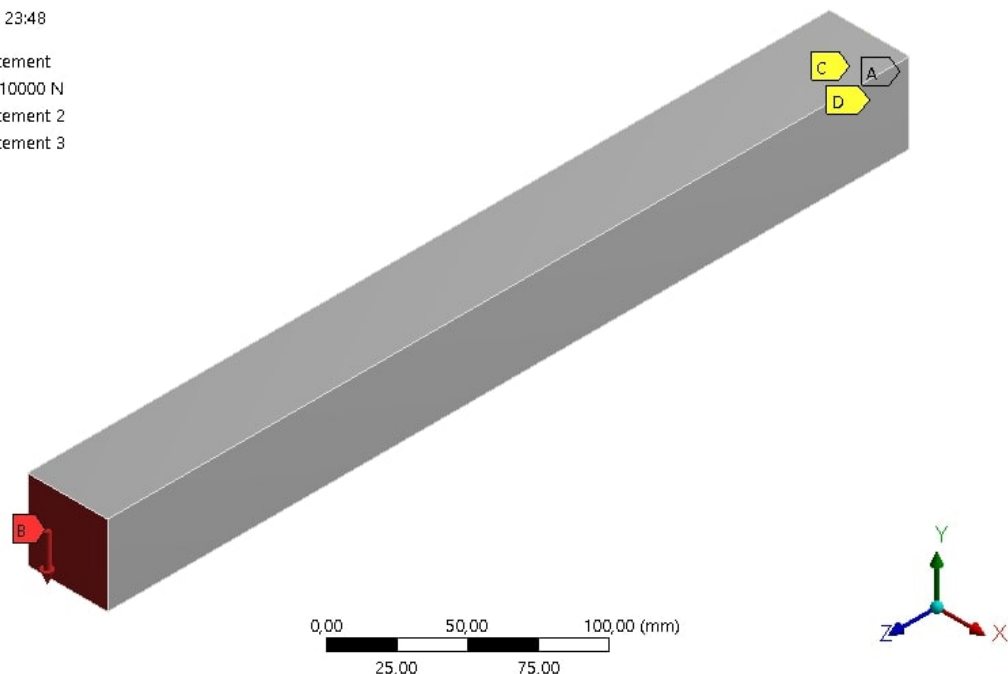
20.03.2019 23:48

A Displacement

B Force: 10000 N

C Displacement 2

D Displacement 3



Obr. 6.2: Modelový príklad - okrajové podmienky

Sieť a použité prvky:

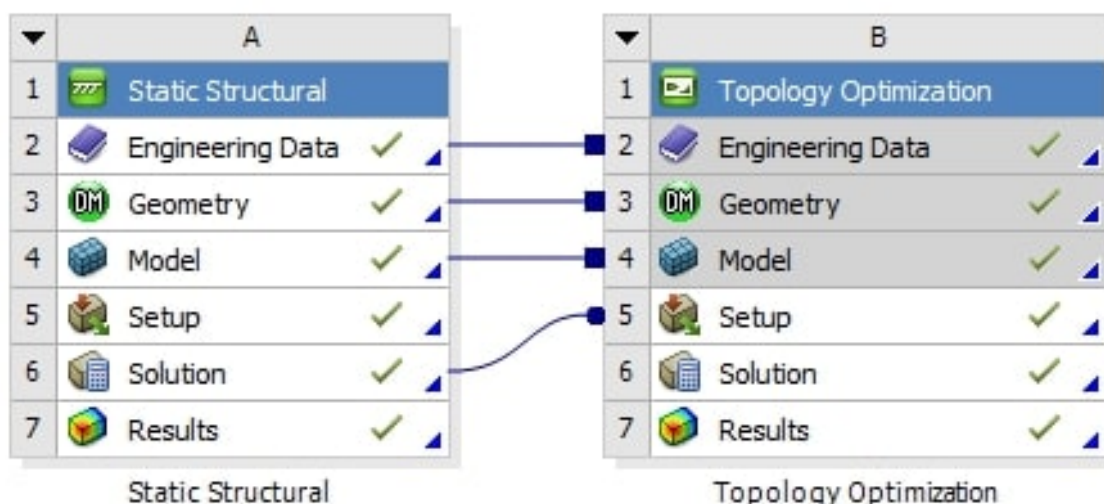
Optimalizovať geometriu je možné len pre určité typy prvkov. Sú to:

- SHELL 181
- PLANE 182
- PLANE 183
- SOLID 185
- SOLID 186
- SOLID 187

Zvolený bol kvadratický prvok *SOLID186* a veľkosť prvku bola stanovená pomocou príkazu *BodySizing* s veľkosťou *2mm*. Celkovo bola vytvorená sieť z 80 000 elementov a 345 681 uzlov.

6.1 Topologická optimalizácia v ANSYSE

Na začiatku pred topologickou optimalizáciou je potrebné vykonať statickú(konštrukčnú) alebo modálnu analýzu. Nie je možné vykonávať len samotnú topologickú optimalizáciu.



Obr. 6.3: Schéma výpočtu

Nasledujúce funkcie je možné zvoliť v *Toolbar* s názvom *Enviroment*. Po zvolení niektorých z týchto možností sa daná možnosť pridá do stromu výpočtu.

Objective

Je špecifikácia objektívnej funkcie, čo znamená, ktorá funkcia má byť optimalizovaná. Objektívna funkcia je hľadaná väčšinou ako minimum v priestore návrhových parametrov. Za návrhové parametre sú najčastejšie považované tuhosti jednotlivých elementov. Ak je zadaná statická aj modálna analýza a je potrebné brať do úvahy výsledky aj z modálnej aj zo statickej úlohy do TO, zobrazí sa vo funkcii Objective ďalšia možnosť. Pri objektívnej funkcii z výsledkov z modálnej analýzy je možné nastaviť mód, s ktorým bude pracovať TO. Preddefinovaný mód je vždy prvý. Následne je možné nastaviť váhu pre jednotlivé objektívne funkcie, či už pre výsledky zo statickej alebo z modálnej analýzy. Zároveň je možnosť nastaviť aj váhu pre jednotlivý podkrok výpočtu (*LoadStep*).

- **Compliance** - pre aktuálnu iteráciu TO sa berie do úvahy aktuálny vektor posunutia a aktuálna matica tuhosti a vynásobia sa skalárnym súčinnom, z čoho sa vypočíta číslo, skalár, ktorý korešponduje s deformačnou energiou. Tým pádom sa hľadá minimum deformačnej energie.

$$\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K}(x) \cdot \mathbf{u} \Rightarrow \text{minimum deformačnej energie} \quad (6.1)$$

pre viac záťažných stavov platí:

$$\sum \mathbf{w}_i \cdot \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{K}(x) \cdot \mathbf{u}_i \quad (6.2)$$

\mathbf{w} - váhové funkcie

- voľba tejto objektívnej funkcie je najčastejšia \Rightarrow hľadáme optimálnu konštrukciu tak, aby preniesla záťaženie a jej deformačná energia dosahovala minima.

- **Volume = Mass** - to platí len pre konštrukciu, kde máme len 1 materiál. Minimalizuje sa objem alebo hmotnosť. Tiež veľmi častá minimalizácia objektívnej funkcie.

- **Local DOF, Displacement** - v 19.2. nie je, nachádza sa v starších verziách. V určitom bode a v určitom smere sa minimalizuje posunutie. Hľadá sa optimálna konštrukcia, aby bola čo najtužšia za určitej hmotnosti
- **Frequency** - voľba tejto objektívnej funkcie je len pre TO, ktorej základ tvorí modálna analýza. U modálnej analýzy sa používa objektívna funkcia maximalizácie frekvencie, to znamená, že sa hľadá optimálny návrh tak, aby pri danom tvare kmitu bola konštrukcia čo najľahšia, ale zároveň čo najtužšia. Je možnosť nastaviť objektívnu funkciu aj pre viacero vlastných tvarov pomocou *MultiStep*.
- **Reaction Force, Local Stress, ...**

V najnovšej verzii ANSYS Workbench 19.2 sa nachádzajú možnosti minimalizácie objektívnej funkcie zo statickej analýzy len *Compliance*, *Volume* a *Mass*.

V modelovom príklade bola zvolená objektívna funkcia *Compliance*.

Response Constrain

Označujú väzby modelu - *constrainty*. Sú zadávané tak, aby výpočet nesmeroval k nezmyselným hodnotám a držal sa v reálnych proporciách konštrukcie. TO prebieha tak, že sa menia tuhosti jednotlivých elementov, aby sa hľadal optimálny topologický návrh. Bežne je možné, že je výpočet prevádzaný za podmienok, keď je konštrukcia nereálna. Ak je konštrukcia príliš preväzbená, nemusí existovať už riešenie nami zvoleného problému.

Možnosti zvolenia *constraintu*:

- **Mass** - tento constrain nastavuje TO tak, že sa snaží vždy nájsť optimálny návrh bez predošlej závislosti energie napätosti zo statickej úlohy. Na druhej strane je nutné zvoliť objektívnu funkciu *Compliance*. Môže sa stať, že ak nezvolíme objektívnu funkciu *Compliance*, hmotnosť sa bude limitne blížiť k 0 a TO nebude konvergovať. Táto možnosť je definovaná pomocou intervalu alebo zvolenej konštanty, na koľko percent z celkovej hmotnosti sa má daná konštrukcia odľahčiť.

V modelovom príklade bola zvolená hodnota tejto funkcie na 50

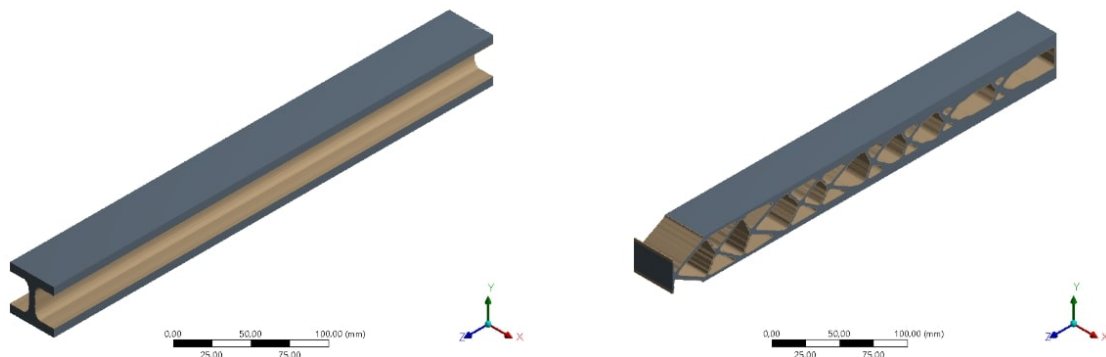
- **Volume**
- **Global von-Mises Stress**
- **Local von-Mises Stress**
- **Displacement**
- **Reaction Force**

Manufacturing

Je možnosť špecifikovať výrobné postupy, akými je konštrukcia vyrobená. Táto funkcia má značný vplyv na to, ktorým elementom sa bude pridávať aká hustota.

- **Member Size** - táto funkcia určuje minimálnu resp. maximálnu veľkosť vnútorných dutín, ktoré sa vytvoria v telese
- **Pull Out Direction**

- **Extrusion** - tzv. vytiahnutie vo zvolenej osi znamená, že teleso má všetky prierezy rovnaké podľa zadanej osi. Obmedzenie tejto funkcie je len pre tetraedrickú sieť, kedy nedokáže podporovať takáto sieť funkciu *Extrusion*.



Obr. 6.4: Výsledok TO modelového príkladu s funkciou Extrusion podľa osi Z a podľa osi X

- **Cyclic** - vytvorí cyklicky sa opakujúce tvary
- **Symmetry** - vytvorí symetrický diel podľa zadanej osi

Nasledujúce možnosti nastavenia je možné nájsť len v strome výpočtu.

Analysis Settings

- **Max. Iteration** - maximálny počet iterácií, potom sa výpočet zastaví. Odporúča sa nastaviť, čo najväčšie číslo, z dôvodu, že výpočet nemusí skonvergovať po malom počte iterácií.
- **Min. Density** - každý element je násobený násobiteľom x hustoty vypustených prvkov, takže postupne sa znižujú hustoty jednotlivých elementov. Táto hodnota zabráňuje singularite matice tuhosti a preddefinovaná hodnota je 0,001. To znamená, že tieto elementy fungujú 0,001 z hľadiska hustoty v jednotlivých maticiach.
- **Penalty Parameter** - preddefinovaná hodnota je 3. Ovplyvňuje tuhosť tak, že umocňuje parameter *Min.Density*.

$$t = x^p \quad (6.3)$$

$$p = \text{PenaltyParameter}$$

Tuhosť z pohľadu modulu pružnosti sa mení podľa tohto *Penalty Parametru*. Preddefinované hodnoty *Min.Density* a *Penalty Parameter* určitým spôsobom korešpondujú s bežným materiálom ako je napr. oceľ.

- **Convergence Accuracy** - určuje, kedy bude výpočet ukončený. Je označovaná ako tolerancia zmeny objektívnej funkcie. To znamená, ak následné 2 iterácie sa nezmenia o túto hodnotu, tak sa výpočet ukončí.
- **Solver Type** - je možnosť výberu typu metódy riešenia.

- *Program Controlled* - využívaná metóda *Sequential Convex Programming* (Metóda sekvenčného konvexného programovania)
- *Sequential Convex Programming (SCP)* - je to rozširujúca metóda pohybujúcich sa asymptót (Method for Moving Asymptotes - MMA). Vyžaduje derivácie všetkých funkcií prítomných danej úlohe. MMA je nelineárny programovací algoritmus, ktorý aproximuje riešenie topologickej optimalizácie tým, že rieši sekvenciu konvexných a separovateľných problémov(funkcií). Toto riešenie je efektívne vďaka špeciálnej štruktúre týchto funkcií. SCP metóda zaisťuje konvergenciu tým, že odmieta kroky, ktoré nevedú k optimálnemu riešeniu základného problému.
- *Optimality Criteria* - je metóda na riešenie problémov topologickej optimalizácie pomocou objektívnej funkcie *Simple Compliance*, ktorá využíva väzby modelu(Response Constrain) *Volume* alebo *Mass*. Je to iteratívna metóda, ktorá by sa nemala využívať pri modálnej analýze.

Všetky hodnoty v sekcii Analysis Setting v modelovom príklade boli preddefinované systémom Ansys.

Optimization Region

- **Design Region** - návrhový priestor, v ktorom sa má TO odohrávať V modelovom príklade bolo zvolené celé teleso.
- **Exclusion** - naopak je to priestor, v ktorom nemá prebiehať TO a táto časť ostáva nezmenená oproti statickej/modálnej analýze.

V ukázkovom príklade sa nevyberal žiadny priestor (objem, plocha, hrana), ktorý by nemal byť optimalizovaný.

Solution - Topology Density

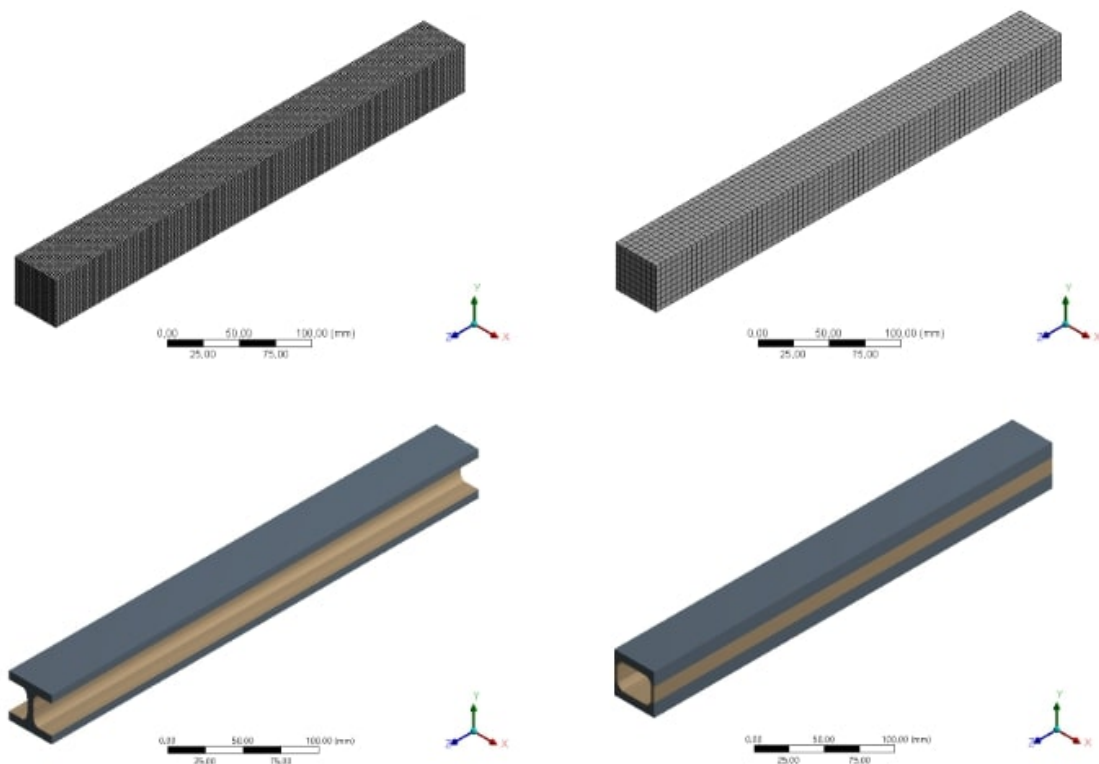
Retained Threshold - táto možnosť vychádza z tzv. čierno-bielej metódy, kde znamená, že prvok označený 1 (čierny) musí v danej topológii ostať, naopak element označený 0 (biely) je úplne vypustený z konštrukcie. V tejto možnosti je možné podľa ľubovôle nastaviť tzv. šedé elementy $< 0,01; 0,99 >$. Preddefinovaná hodnota je 0,5

Všetky zobrazené výsledné tvary z TO modelového príkladu boli vykreslené pre *Retained Threshold* 0,5.

Veľký vplyv na výsledok z topologickej optimalizácie má kvalita siete, veľkosti elementov, ale aj počet elementov. Rozdielny vplyv vyňatia materiálu je možné vidieť na Obr 6.5, kde rozdiel bol len v zmene počtu elementov. Výsledky statickej analýzy boli rozdielne len minimálne. Rozdiel bol len v elementoch spojených s okrajovými podmienkami, kde dochádzalo pri zjemňovaní siete k špičkovým napätiam. Avšak pri rovnakom nastavení topologickej optimalizácie, typu prvku aj okrajových podmienok v statickej analýze bol výsledok TO rozdielny. V tomto prípade bola v oboch prípadoch nastavená funkcia *Extrusion* v smere osi *Z* a *Response Constrain* bola zvolená väzba modelu *Mass* s konštantnou hodnotou 50%. Hmotnosť výsledných tvarov bola v prípade a) 2,4366 kg a v prípade b) 3,137 kg

Správnosť definovania úlohy má vplyv na výsledky TO. V mechanike sa statické modely rozdeľujú na:

- staticky určité



Obr. 6.5: a) sieť a výsledok TO pre 80000 prvkov b) sieť výsledok TO pre 5120 prvkov

- staticky neurčité
- staticky preurčité

Staticky určité úlohy dávajú jedno riešenie a reakcie sú nezávislé na tuhosti konštrukcie. To znamená, že výsledkom z TO budú vždy rovnaké reakcie nezávisle na tom, ako bude prebiehať TO.

Pri neurčitom modeli (viac okrajových podmienok než je potreba) má konštrukcia len jedno riešenie, ale menia sa reakcie podľa toho ako sa mení tuhosť konštrukcie.

V preurčitom modeli je nekonečne veľa riešení, takže tejto úlohe sa snažíme vyhnúť. To platí aj na začiatku TO ale aj v priebehu celej optimalizácie. Takýto problém nie je možné ďalej riešiť.

Je potrebné brať do úvahy, že TO môže meniť statickú určitosť počas riešenia. Táto vlastnosť môže viesť k rozpojeniu - rozdeleniu celej konštrukcie. V tomto prípade celý výpočet by mal spadnúť. Avšak ak sa tak stane, bolo by potrebné pridať ďalšiu okrajovú podmienku na časť, ktorá sa oddelila napr. určitú hodnotu limitného posunutia, a tým by mala byť zaručená spojitosť konštrukcie. Ďalšou možnosťou je zmena objektívnej funkcie a tým aj zmena Constraintu.

Pri zohľadnení výsledkov z modálnej analýzy je potrebné spomenúť, že ak sa nastaví daný mód v objektívnej funkcii, počas výpočtu sa môže tento mód zmeniť. To znamená, že ak napr. 1. mód bol ohybový v určitom smere, môžu sa zmeniť kmity a dôjsť aj k napr. torzným kmitom.

Dôležité je tiež aj nastavenie správnych jednotiek. TO môže počítat aj v iných jednotkách ako sú nastavené v prostredí Workbench. Môže sa stať, že statická úloha je počítaná

napr. v *mm* a TO je počítaná v iných jednotkách, tak má úloha o niekoľko rádov iné Constraints. Túto chybu je možné si skontrolovať vo výsledkových súboroch *topo.out* a *topo.err*.


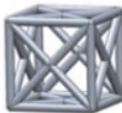





Každý výsledný tvar konštrukcie je nutné potom následne ešte skontrolovať z hľadiska všetkých možných medzných stavov. Netreba zabudnúť aj na MS spojené s vybočením alebo s vybúlením konštrukcie.

V novších verziách (od verzie 18.1.) je možné sledovať priebeh TO pomocou *Topology Density Tracker*. Táto funkcia ukazuje ako sa TO vyvíja pre jednotlivé iterácie a tým je možné ukončiť TO ešte pred úplným skonvergovaním a nájdením najvhodnejšieho tvaru. Je možné zastaviť hľadanie optimálneho návrhu aj skôr, ak je pre nás aktuálny návrh dostačujúci.

Topologická optimalizácia vo verzii 19.2. nepodporuje niektoré možnosti výpočtu ako trhliny, veľké deformácie pri statickej analýze, nelineárne kontakty (podporuje len kontakt Bonded a No Separation), osovo symetrický model ak je definovaná podmienka Global von-Mises Stress Constrain alebo Local von-Mises Stress Constrain a iné. [7],[23] [9]

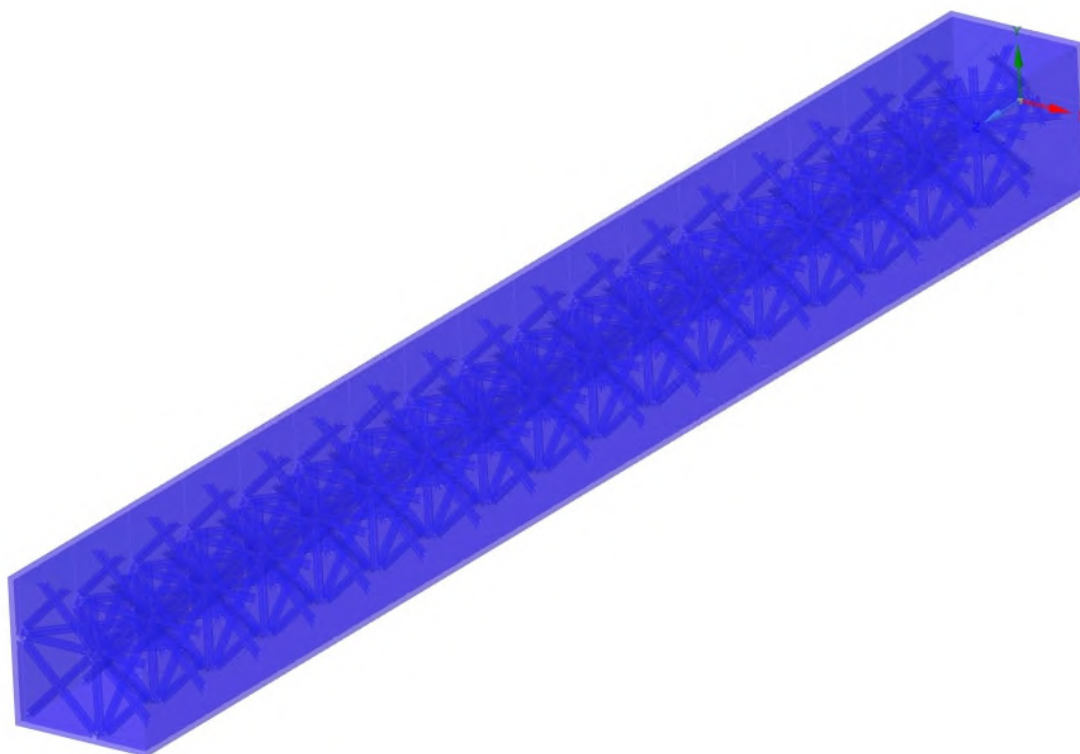
Lattice Optimization Analysis

Lattice Optimization Analysis je ďalšia z možností optimalizácie, kedy sa optimalizuje tvar pomocou určitej mriežky a mriežkových štruktúr, kedy sa plný diel nahradí mriežkovou štruktúrou. Celá optimalizácia je riadená pomocou záťažných stavov a okrajových podmienok z predchádzajúcich analýz. Túto možnosť optimalizácie je možné si zvoliť pod časťou *Optimization Region*, kde je možnosť prepnúť Topology Optimization na Lattice Optimization. [9]

Cubic (default)		Crossed	
Midpoint		Octahedral 1	
Octet		Octahedral 2	
Diagonal			

Obr. 6.6: Typy mriežok používajúce sa v Lattice Optimization [9]

Modelový príklad bol taktiež modelovaný aj týmto typom metódy ako je možné vidieť na Obr 6.7.



Obr. 6.7: Vyplnenie vnútorného objemu Crossed mriežkou

Kapitola 7

Nastavenie výpočtového modelu - Statická analýza

Ako bolo spomenuté v kapitole 2.4 pre riešenie problému pomocou MKP bol zvolený softvér Ansys Workbench, konkrétne verzia 19.2.

Model geometrie súčasných dosiek bol dodaný firmou KraussMaffei. Tieto modely obsahovali množstvo montážnych upínacích dier, zaoblení skosení a pod., ktoré boli vzhľadom k riešeniu problému na danej rozlišovacej úrovni odstránené, resp. sa do výpočtu nezahŕňali. Táto úprava bola realizovaná z časti už v softvéri *Creo Parametric*, kedy sa odstránili všetky diery a niektoré zkosenia a zaoblenia a vytvoril sa u všetkých platní polovičný model, keďže bolo možné využiť symetriu. Takto upravené modely boli následne exportované do súboru *STEP* ako objemové telesá. Určité úpravy boli vykonané priamo v programe Ansys, buď v časti programu DesignModeler alebo v SpaceClaim. Jednalo sa o úpravy, kde program Creo Parametric nebol schopný vytvoriť plochy a objemy po odstránení niektorých zaoblení. Napriek tomu v modeloch zostali určité zaoblenia, ktoré nebolo možné odstrániť, resp. ani softvér Ansys nedokázal dopočítať takéto plochy. Následne bol objem jednotlivých platní porozdeľovaný na viac pod oblastí (podobjemov), pretože niektoré objemy museli byť zachované, kvôli rozličným funkciám na platniach. Tento krok sa vykonal kvôli tomu, aby sa v týchto daných objemoch nevykonávala neskoršia topologická optimalizácia. Následne sa všetky pod oblasti spojili do jedného telesa v časti programu DesignModeler pomocou príkazu *From New Part*.

Je potrebné dodať, že každá doska bola modelovaná zvlášť.

7.1 Pevná doska KM200

Po odstránení dier, zkosení a zaoblení polovica pevnej dosky mala hmotnosť 599 kg. Model geometrie je možné vidieť na Obr. 7.1.

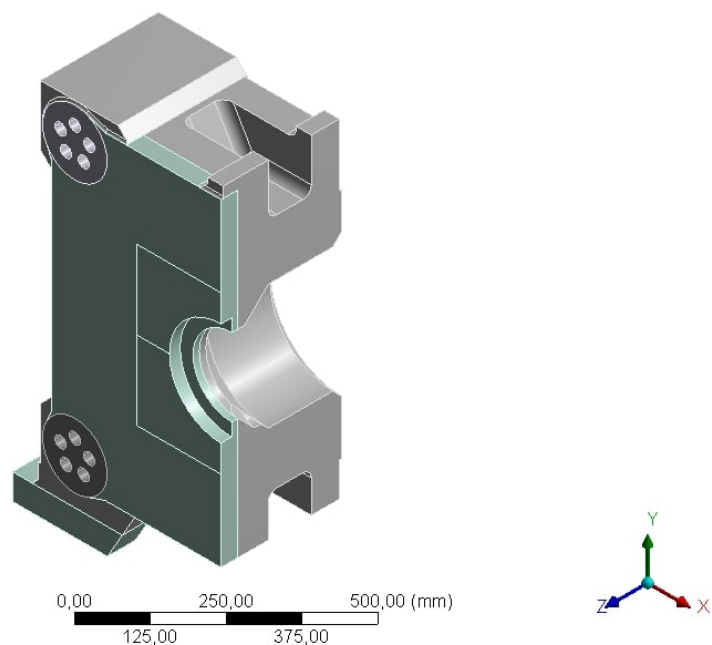
Model materiálu bol zvolený *Structural Steel* s materiálovými charakteristikami:

$E = 200000 \text{ MPa}$ Youngov modul pružnosti v ťahu

$\mu = 0,3$ Poissonov pomer

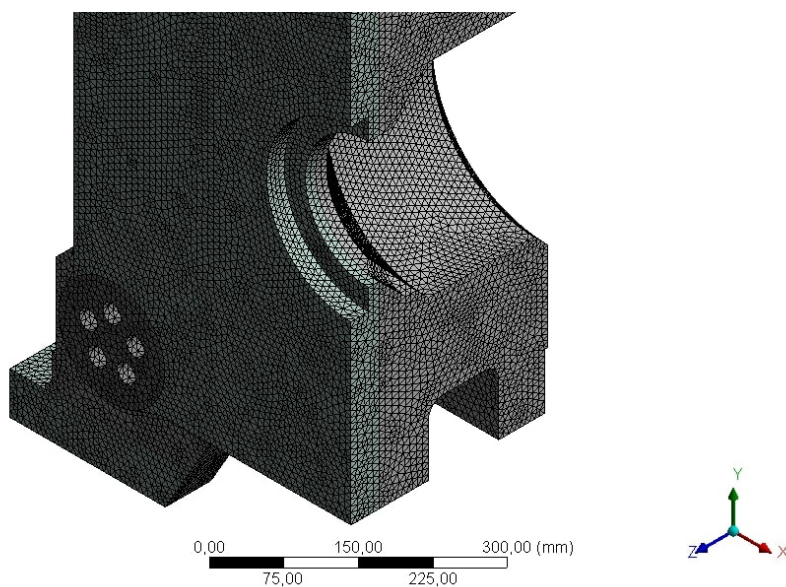
$\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ hustota materiálu

Tento materiálový model bol konzultovaný a одобrený pracovníkom firmy KraussMaffei, aj keď všetky platne sú vyrábané technológiou odlievania. Následne bola vytvorená koneč-



Obr. 7.1: Geometria pevnej dosky KM200

noprvková sieť. Veľkosť prvku bola riadená pomocou príkazu *Body Sizing* s veľkosťou elementu 8 mm na všetky podoblasti. Bol použitý kvadratický tetraedrický prvok *SOLID187*. Bolo zistené, že ďalšie zjemňovanie siete nemá podstatnejší vplyv na hodnoty napätí. Môže sa zdať, že táto sieť je už zbytočne jemná, avšak z dôvodov výsledkov topologickej optimalizácie, ktoré sú taktiež závislé na veľkosti elementu a zároveň na spôsobe výberu elementov - viď skúšobný príklad Obr. 6.5, bola zvolená práve takáto veľkosť prvku. Celkovo sieť obsahovala 1 299 854 prvkov a 1 797 412 uzlov.



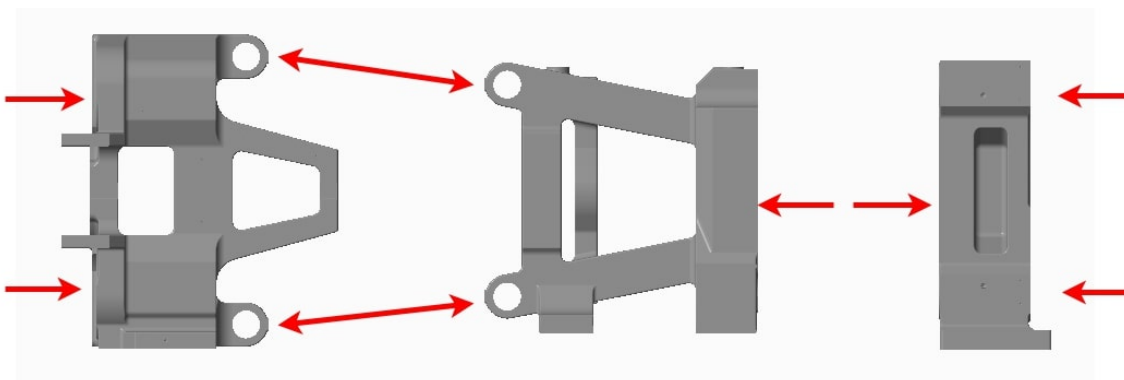
Obr. 7.2: Detail siete pevnej dosky KM200

Následne boli definované pevnej platne okrajové podmienky. Keďže bola využitá symetria, okrajová podmienka *DISPLACEMENT A* zamedzuje posuv v smere osi *X* a bola zadaná na plochy rezu. Okrajová podmienka *DISPLACEMENT D* bola zvolená na horný bod, kde pôsobila sila od formy a zamedzoval posuv v smere osi *Z*. Posledná deformačná okrajová podmienka *DISPLACEMENT E* bola zvolená na dolný bod kde pôsobila sila od formy a zamedzovala posuv v smere osi *Y* a *Z* viď Obr. 7.6. Tieto okrajové podmienky boli zadane kvôli neskoršej kontrole MS deformácie a zároveň k určitej analógii k výpočtovému modelovaniu vo firme KraussMaffei.

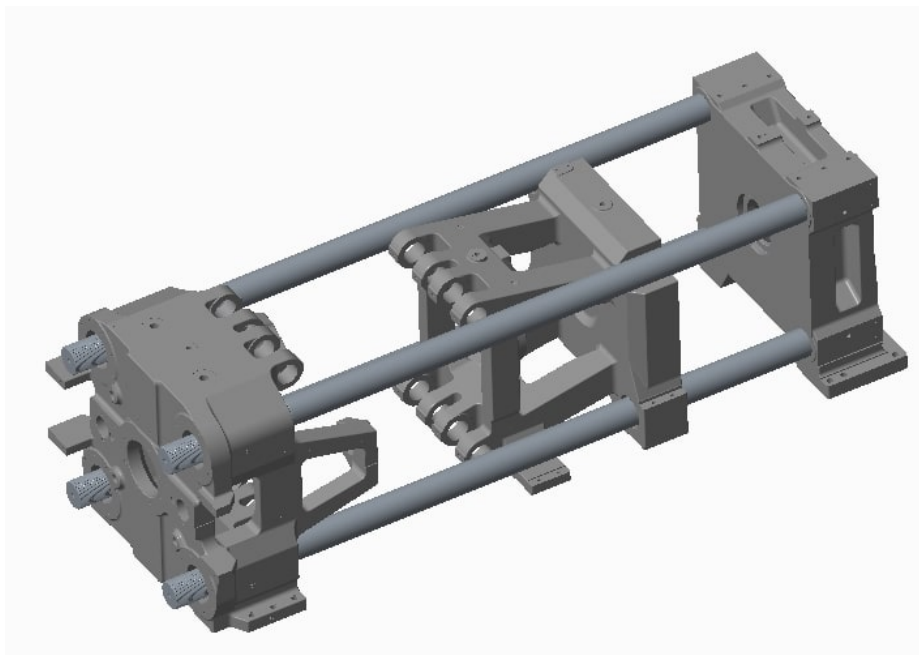
Silové okrajové podmienky súvisia s označením KM200. KM znamená skratku názvu firmy KraussMaffei a číselné označenie znamená lisovacu “silu” v tonách, ktorá je vyvíjaná na formu medzi pevnou a pohyblivou platňou. V praxi sa táto hodnota v tonách prevedie na jednotku *Newton [N]* tak, že sa vynásobí 10 000, kde je už zahrnutý prevod na kilogramy a zároveň pomocou Newtonova zákona $F = m \cdot a$ je určená sila, kde $a = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. To znamená že vo vstrekolise KM200 je uzatváracia sila medzi pevnou a pohyblivou platňou:

$$F_{200} = 2000000 \text{ N} = 2 \text{ MN} \quad (7.1)$$

Táto uzatváracia sila primárne vzniká od kĺbového mechanizmu, ktorý sa nachádza medzi opornou (základnou) doskou a pohyblivou doskou. Kvôli autorským právam firmy KraussMaffei však nebolo možné dodanie modelu a rozmerov týchto mechanizmov a boli poskytnuté len pozície jednotlivých dosiek voči sebe pri maximálnom zatažení. Sila medzi doskami sa prenáša z kĺbového mechanizmu na opornú dosku a pohyblivú dosku (zákon akcie a reakcie). Z opornej dosky sa sila prenáša pomocou vodiacich valcov na pevnú dosku a zároveň z pohyblivej dosky sa prenáša sila cez formu na pevnú dosku. To celé vytvára tzv. uzatvorený “trojuholník” síl. Na Obr. 7.3 je názorne zobrazený tok síl medzi jednotlivými doskami.

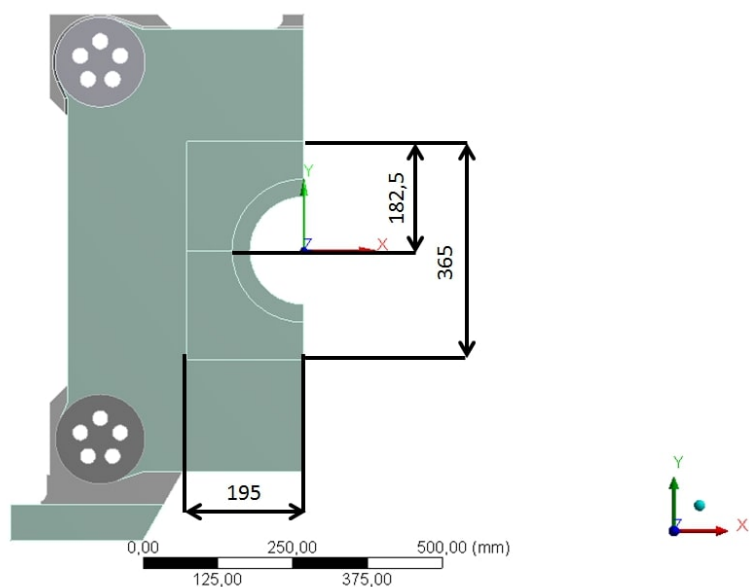


Obr. 7.3: Silový tok medzi doskami KM200



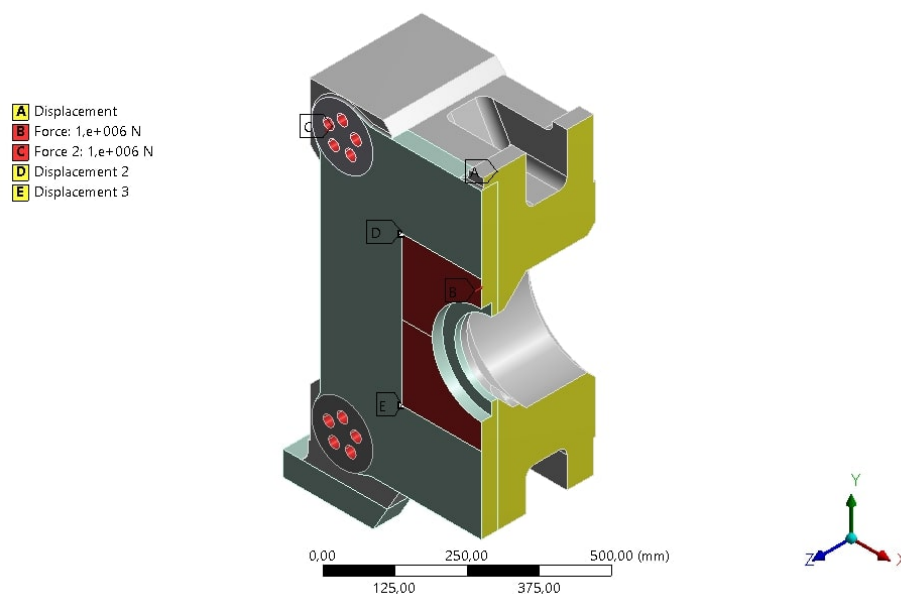
Obr. 7.4: Zobrazenie vodiacich valcov KM200, cez ktoré sa prenáša sila medzi pevnou(úplne vpravo) a základovou doskou (úplne vľavo)

Prvé silové zaťaženie sa u pevnej platne predpisovala na plochu, ktorej veľkosť a umiestnenie je zadané firmou KraussMaffei. Táto plocha predstavovala najmenšiu možnú formu, ktorá je pripevnená na platňu. Zároveň je to najkonzervatívnejšie riešenie, keďže sa sila rozkladá na najmenšiu plochu a tým vznikajú najväčšie axiálne posuvy a napätia. Veľkosť plochy a zároveň aj umiestnenie je zobrazené na Obr. 7.5.



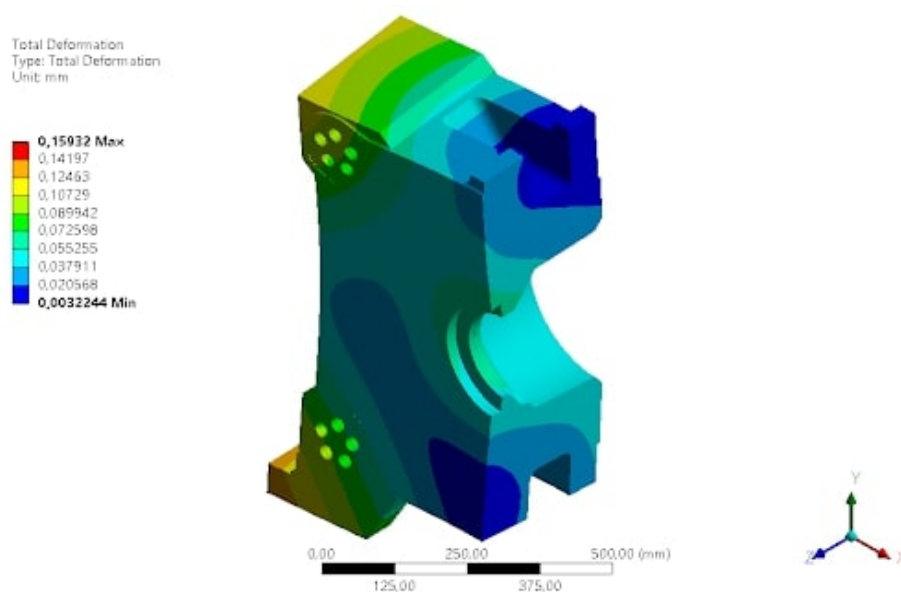
Obr. 7.5: Veľkosť minimálnej formy pre vstrekolis KM200

Sila, ktorá sa prenášala cez vodiace valce bola predpísaná na vnútorné plochy dier, cez ktoré boli tieto valce upevnené na pevnú platňu. Obe sily mali polovičnú veľkosť, keďže sa uvažovala symetria. Tieto sily mali hodnotu 1 MN a smerovali proti sebe rovnobežne s osou Z . Všetky zadané okrajové podmienky, ktoré boli zadávané do programu Ansys Workbench, sú zobrazené na Obr. 7.6.



Obr. 7.6: Okrajové podmienky pevnej dosky KM200

Na Obr. 7.7 je vykreslená celková deformácia pevnej platne. Táto deformácia je primárne v osi Z v absolútnom súradnicovom systéme.



Obr. 7.7: Deformácia pevnej dosky KM200

Táto platňa musí spĺňať určité požiadavky. Jednou z požiadaviek bola deformácia v smere pôsobenia sily od formy, v tomto prípade proti smeru osi Z . Na vodorovnej a zvislej hrane upnutej formy firma KraussMaffei dodržiava deformáciu $0,15 \text{ mm/m}$. V diagonálnom smere nemôže prekročiť deformácia hodnotu $0,25 \text{ mm/m}$. Tieto hodnoty sú stanovené kvôli presnosti dosadania polovic formy do seba a zároveň kvôli technológii výroby plastového výrobku. To znamená, že na vodorovnej hrane nemôže prekročiť deformácia hodnotu:

$$0,15 \cdot 0,39 = \mathbf{0,059 \text{ mm}} \quad (7.2)$$

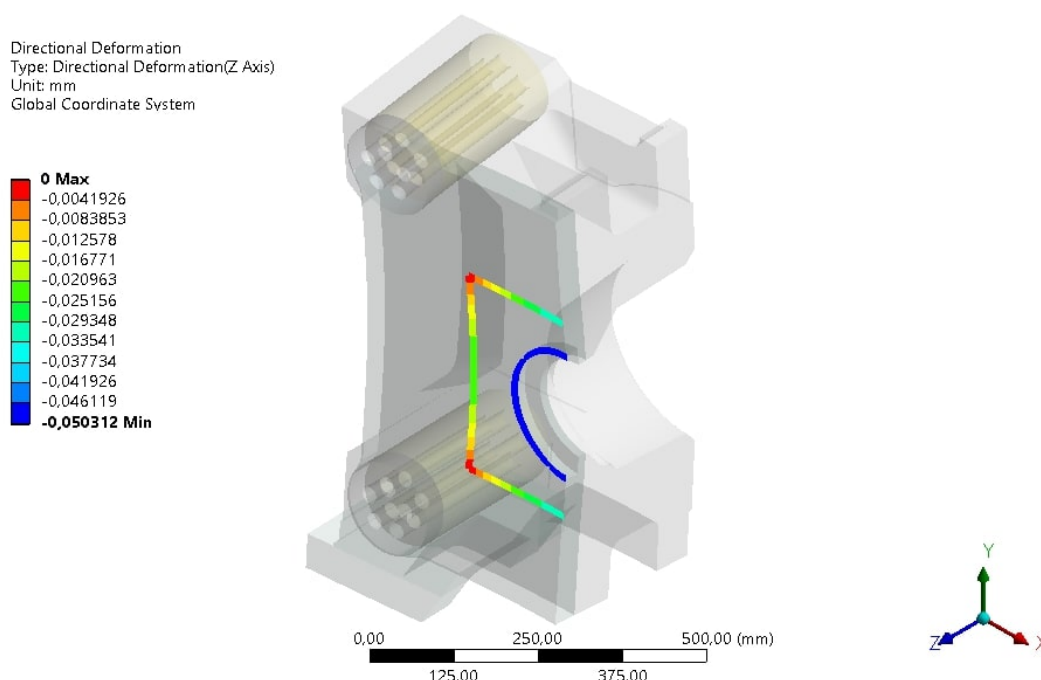
Kvôli zvoleným okrajovým podmienkam *DISPLACEMENT D* a *DISPLACEMENT E* je najväčší posuv na vodorovnej hrane v bode styku so symetriou. Na zvislej hrane je najväčší posuv práve medzi okrajovými podmienkami *DISPLACEMENT D* a *DISPLACEMENT E* a hodnota deformácie nemôže prekročiť:

$$0,15 \cdot 0,365 = \mathbf{0,055 \text{ mm}} \quad (7.3)$$

Na diagonále deformácia nemôže prekročiť hodnotu:

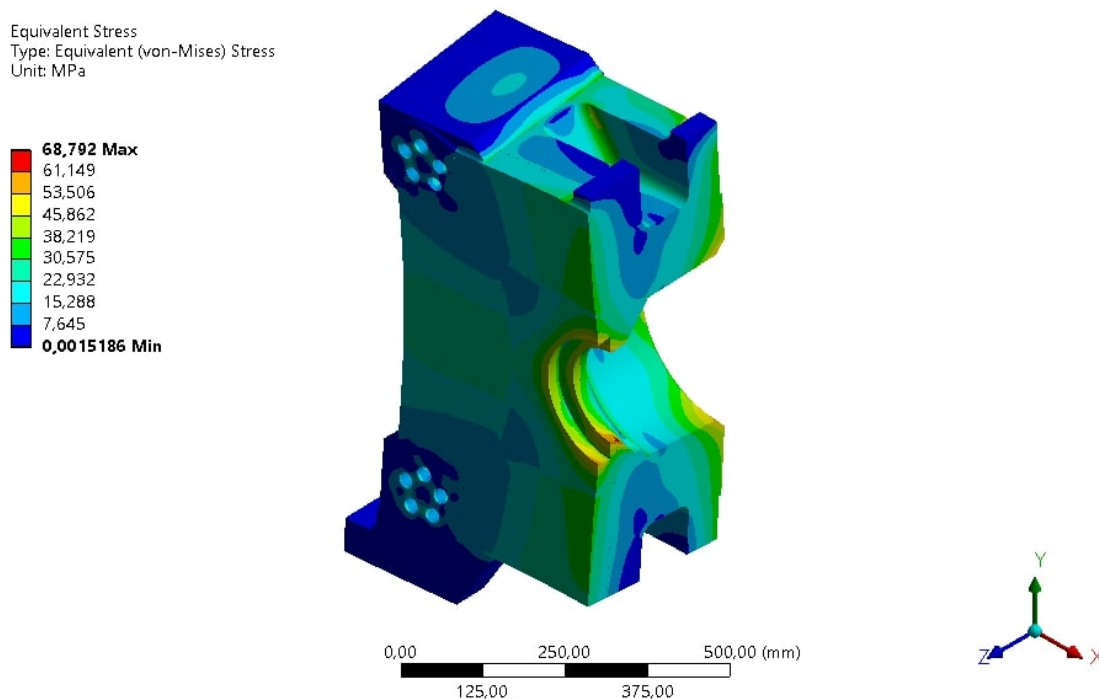
$$0,25 \cdot \sqrt{0,39^2 + 0,365^2} = 0,134 \text{ mm} \quad (7.4)$$

avšak táto hodnota je pre stredový bod, ktorý už sa nenachádza na platni. Najbližšie sa k tejto platni nachádza okrúhla hrana a lineárnou aproximáciou bola stanovená táto hodnota na **0,066 mm**. Táto hodnota nie je presná avšak získanie tejto hodnoty bolo získané veľmi konzervatívnym prístupom. Na Obr. 7.8 je možné vidieť smerovú deformáciu v osi Z len tých hrán na ktoré sa vzťahujú podmienky medznej deformácie.



Obr. 7.8: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM200

Ďalšou podmienkou od firmy KraussMaffei bola kritická hodnota redukovaného napätia, ktorá nemohla prekročiť 145 MPa . V tejto kritickej hodnote je zarátaný MS pružnosti ako aj MS únavy, keďže bežné konštrukčné ocele majú medzu únavy okolo 150 MPa . Na Obr. 7.9 je zobrazené redukované napätie podľa podmienky HMH.



Obr. 7.9: Redukované napätie v pevnej dosky KM200

Ďalším záťažným stavom pevnej dosky bola kontrola voči kritickému napätiu pri záťažení maximálnou hmotnosťou možnej formy a samotnou tiažou dosky. Maximálna hmotnosť formy bola taktiež dodaná firmou KraussMaffei. Tento záťažný stav bol modelovaný spočiatku naraz s predchádzajúcim záťažným stavom, avšak výsledky nebolo možné porovnávať s tabulkovými hodnotami spoločnosti KraussMaffei, keďže tieto hodnoty sú odvodené len pre prvý záťažný stav. Následne bol tento záťažný stav modelovaný pomocou viacerých krokov tzv. *Load Stepov*. Avšak problém nastal pri neskoršom výpočte topologickej optimalizácie kedy riešič topologickej optimalizácie nedokázal načítať vypnuté deformačné podmienky. Topologická optimalizácia v Ansyse dokázala počítať len so zapnutými všetkými okrajovými podmienkami. Takéto modelovanie vzhľadom k skutočnosti nebolo korektné. Preto sa tento druhý záťažný stav modeloval zvlášť v druhej úlohe.

Geometria, materiál a sieť boli zdublikované z prvej úlohy, to znamená, že sa tieto modely voči sebe nelíšili. Zmenil sa len model väzieb a silové pôsobenie. Dôležité bolo určenie pôsobiska a veľkosť gravitačnej sily formy, ktorá bola zadávaná pomocou príkazu *REMOTE FORCE*. Pôsobisko sily bolo určené pomocou pomeru hmotnosti časti formy, ktorá sa upínala na danú dosku. Maximálna hmotnosť polovice formy, ktorá je upnutá na pevnú platňu je 800 kg . Na pohyblivú dosku je možné upnúť väčšiu časť polovice formy a to o hmotnosti 1200 kg . To znamená, že celková maximálna hmotnosť celej formy je 2000 kg . Táto forma bola schématicky zaznačená ako obdĺžnik, ktorý sa rozdelil na 2 časti v pomere $800/2000$ resp. $1200/2000$. Vzdialenosť medzi pevnou a pohyblivou doskou pri

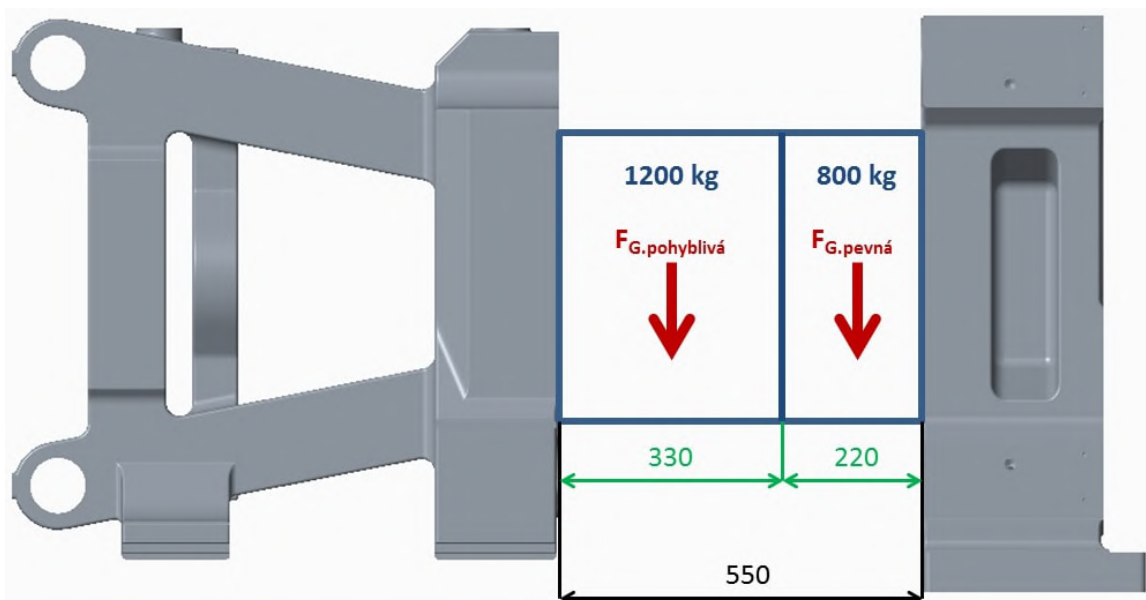
zatvoreni formy je 550 mm , to znamená, že obdĺžnik bol rozdelený na 2 menšie obdĺžniky s dĺžkou formy na pohyblivej doske $550 \cdot 1200/2000 = 330\text{ mm}$ a na pevnej doske $550 \cdot 800/1200 = 220\text{ mm}$. Ťažisko sa nachádzalo v strede týchto obdĺžnikov. Veľkosť sily sa vypočítala pomocou Newtonova zákona $F = m \cdot g$. Keďže bola využitá symetria, bola zadávaná len polovičná veľkosť. Gravitačná sila od časti formy na pevnej platni mala veľkosť:

$$F_{G.pevna200} = 800/2 \cdot 9,81 = 3924\text{ N} \quad (7.5)$$

Zároveň gravitačná sila od časti na pohyblivej platni mala veľkosť:

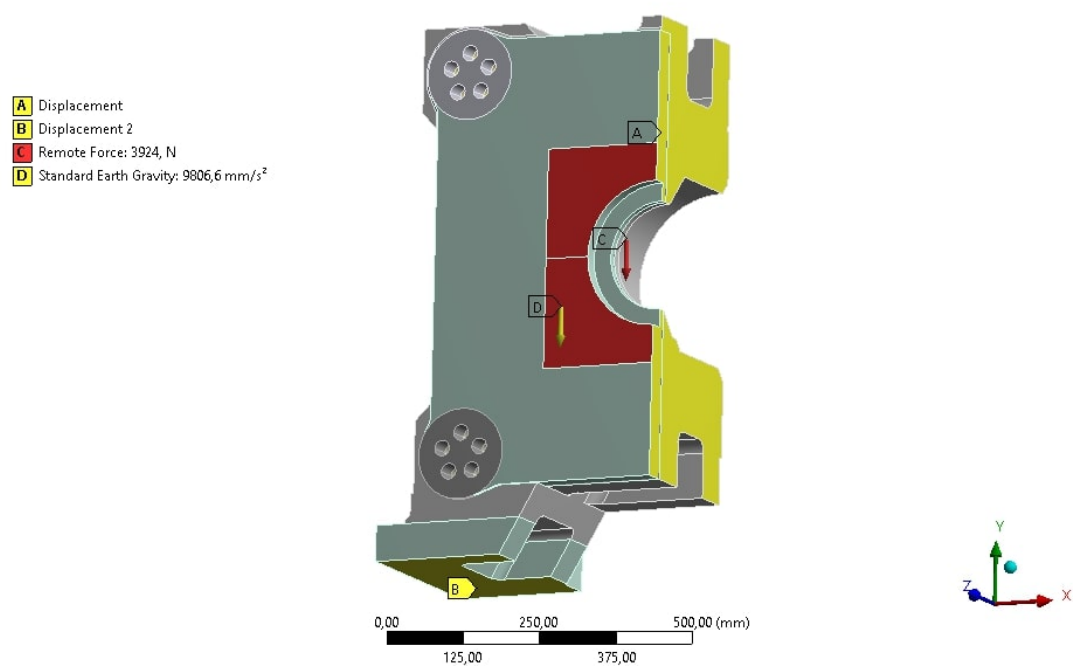
$$F_{G.pohyb.200} = 1200/2 \cdot 9,81 = 5886\text{ N} \quad (7.6)$$

Pre lepšie pochopenie je tento postup vykreslený na Obr. 7.10.



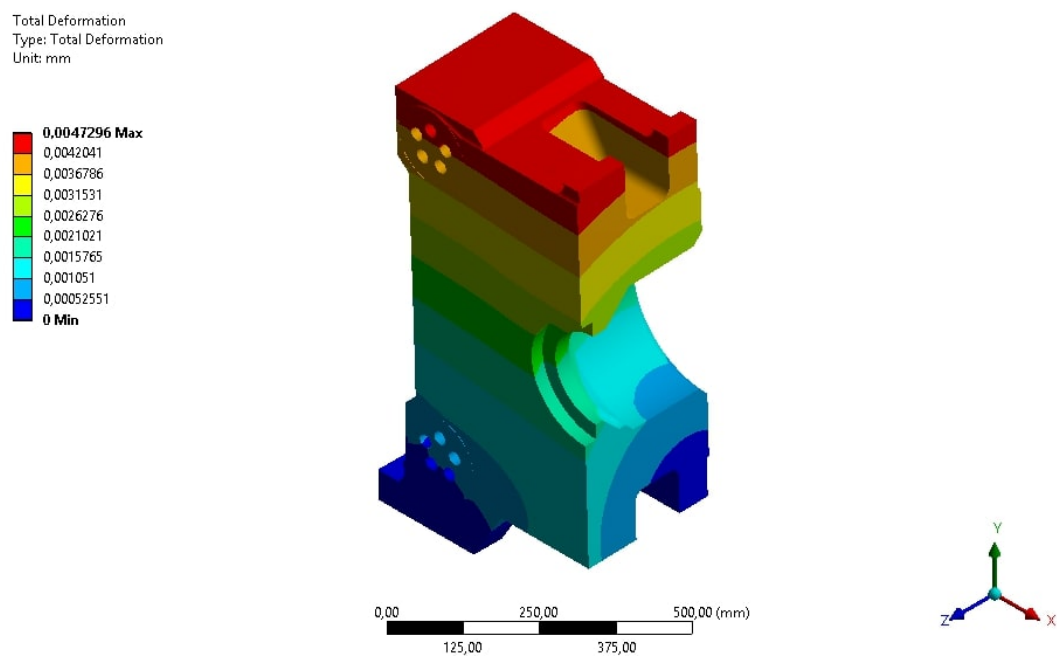
Obr. 7.10: Schématické označenie pôsobenia gravitačných síl od formy vo vstrekolise KM200

Okrajové deformačné podmienky boli predpísané tak, že na plochy rezu symetrie sa predpísala podmienka *DISPLACEMENT A*, ktorá zamedzovala posuv v smere osi X . Ďalšia okrajová podmienka *DISPLACEMENT B* bola predpísaná na spodnú plochu, ktorá je priskrutkovaná napevno k základovému stolu, a zamedzovala posuv vo všetkých smeroch. Silová podmienka *REMOTE FORCE* bola predpísaná v zápornom smere osi Y na tú istú stykovú plochu s formou ako v prvom záťažnom stave a posunutá do súradníc $[0, 0, 110]\text{ mm}$ v absolútnom súradnom systéme. Veľkosť sily bola 3924 N . Ďalej bola zadaná okrajová podmienka zahrňujúca vplyv gravitácie taktiež v zápornom smere osi Y .

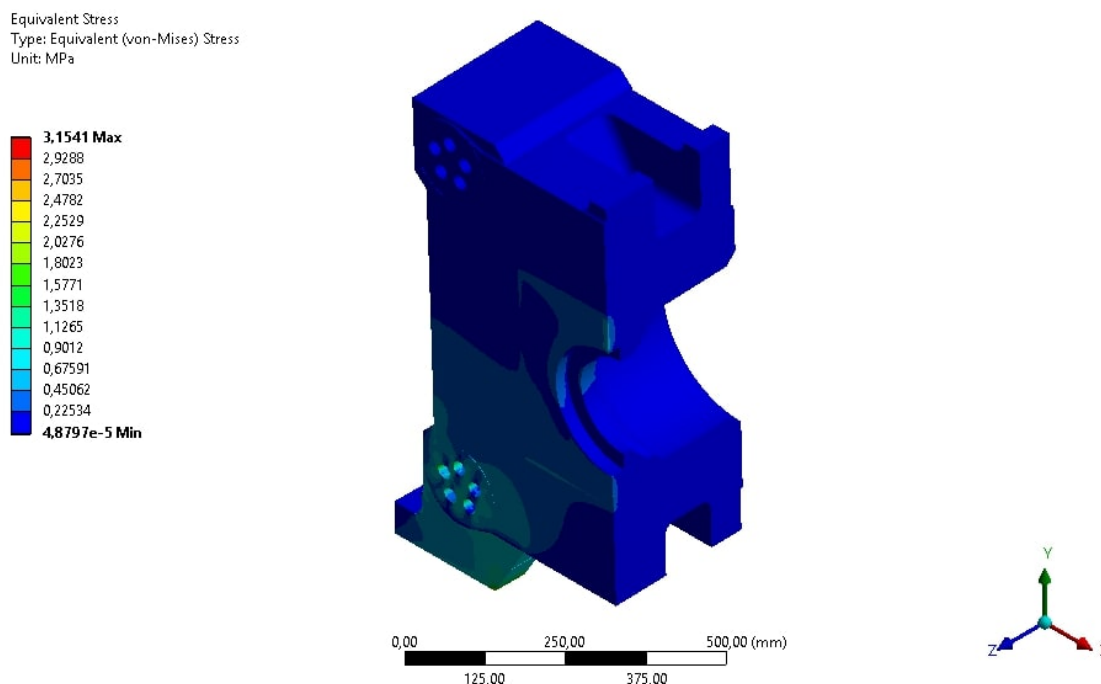


Obr. 7.11: Okrajové podmienky pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

Následne bola vykreslená celková deformácia deformácia a ekvivalentné napätie podľa HMM.



Obr. 7.12: Deformácia pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave



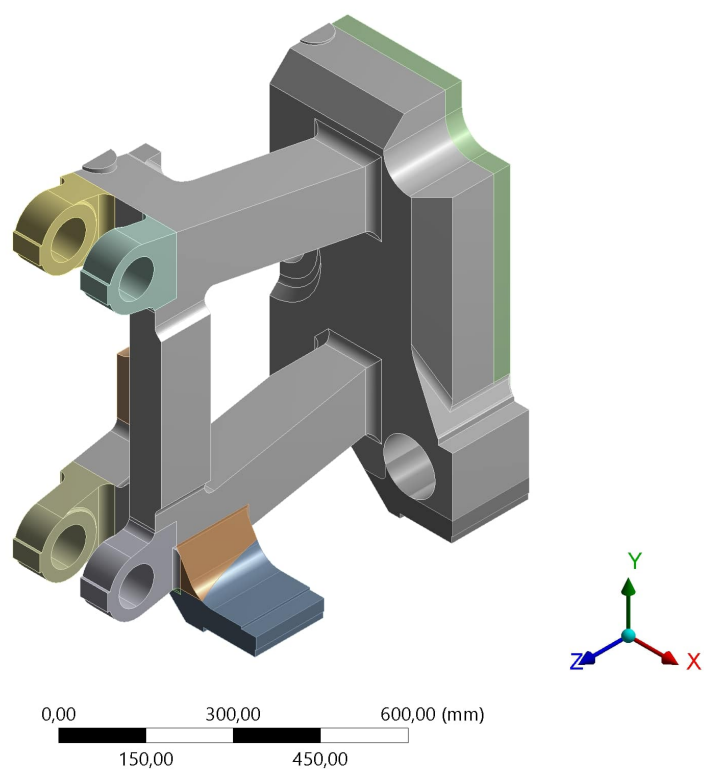
Obr. 7.13: Redukované napätie pevnej platne KM200 v druhom záťažnom stave

Z výsledkov vyplýva, že druhý záťažný stav nie je kritický a ani z ďaleka sa redukované napätie nepribližuje ku kritickej hodnote 145 MPa . Z tohto dôvodu nebolo počítané v topologickej optimalizácii s druhým záťažným stavom. Avšak výsledný model geometrie po topologickej optimalizácii bol kontrolovaný aj na tento záťažný stav.

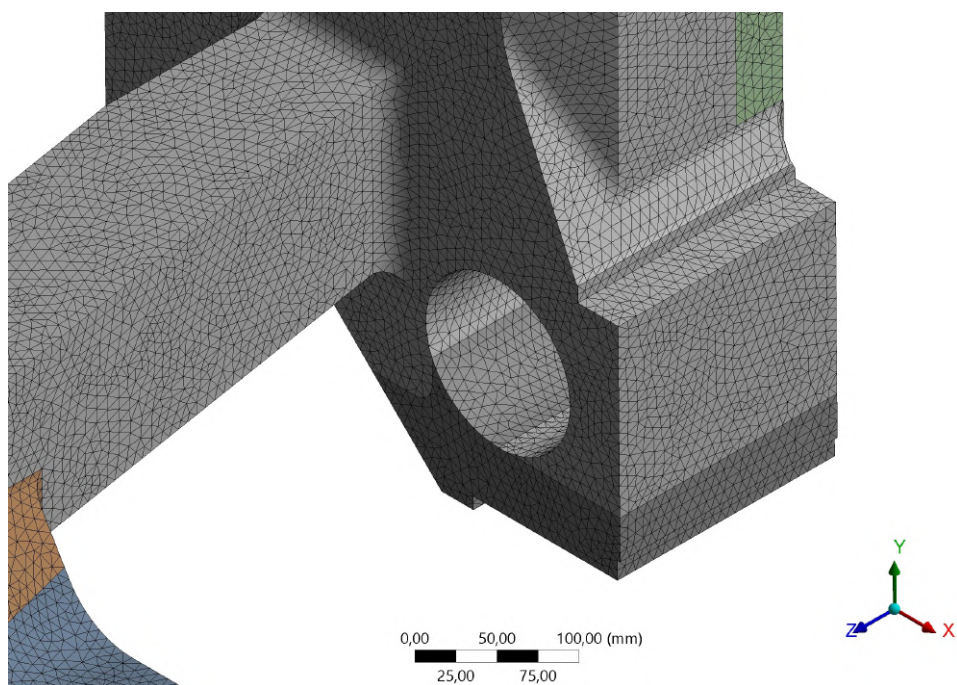
7.2 Pohyblivá doska KM200

Pri pohyblivej doske bol veľmi podobný algoritmus výpočtu ako aj pri pevnej doske. Taktiež bol aj tento model symetrický a bolo možné využiť len polovicu geometrie na statickú analýzu a neskoršiu topologickú optimalizáciu. Polovica pohyblivej dosky mala hmotnosť 683 kg . Model geometrie už rozdelený na jednotlivé podobjemy, ktoré následne nebudú zarátané do topologickej optimalizácie, je možné vidieť na Obr. 7.14

Model materiálu bol zvolený rovnaký ako u pevnej dosky s rovnakými materiálovými charakteristikami vid' materiálové charakteristiky pevnej dosky 7.1. Následne bola vygenerovaná konečnoprvková sieť pomocou príkazu *Body Sizing* s veľkosťou prvku 8 mm na všetky objemy. Taktiež bol zvolený kvadratický tetraedrický prvok *SOLID187*. Čo sa týka jemnosti siete výsledok je podobný ako u pevnej dosky a aj preto sa volila veľkosť prvku rovnaká. Na Obr. 7.15 je zobrazená sieť pohyblivej dosky, ktorá obsahovala 1 480 352 elementov 2 059 382 uzlov.



Obr. 7.14: Geometria pohyblivej dosky KM200



Obr. 7.15: Detail siete pohyblivej dosky KM200

Okrajové podmienky boli taktiež definované rovnakým spôsobom ako u prvej dosky. Okrajová podmienka *DISPLACEMENT A* bola okrajová podmienka symetrie, predpísaná na plochy rezu a zamedzovala posuv v smere osi *X*. Taktiež kvôli analógii výpočtu a kontrole voči MS deformácie boli zvolené ďalšie deformačné podmienky *DISPLACEMENT B* v hornom bode hrán formy, kde bol predpísaný nulový posuv v smere osi *Z*, a okrajová podmienka *DISPLACEMENT C* naopak v dolnom rohu od styku formy, kde bol zamedzený posuv v smere osi *Y* a *Z* vid' Obr. 7.18.

Silové okrajové podmienky vychádzajú z Obr. 7.3. Lisovacia sila medzi pevnou a pohyblivou doskou bola vyjadrená už pre pevnú dosku a keďže platí zákon akcie a reakcie, tak lisovacia sila pre pohyblivú dosku má rovnakú veľkosť ako pre pevnú avšak má len opačný smer.

Bolo potrebné určiť však veľkosť uhlu, pod ktorým sila pôsobila na pohyblivú dosku od kĺbového mechanizmu medzi základovou a pohyblivou doskou. Spočiatku bolo tvrdenie, že sila ktorá vychádza od kĺbového mechanizmu má rovnaký smer ako nôžka pohyblivej dosky. Na skúšobni vstrekolisov bolo však zistené, že uhol nohy pohyblivej dosky a smer síl nebol rovnaký. V prvom kroku bolo nutné zanalyzovať pozíciu samotného kĺbového mechanizmu resp. jednotlivé ramená tohto mechanizmu, ktoré boli pripojené na základovú aj pohyblivú dosku. Tieto ramená majú vlastnosť binárnych členov a tým smery ramien mali rovnaký smer ako aj sily pôsobiace na jednotlivé dosky. Bolo zistené, že maximálna uzatváracia sila pôsobila až vtedy, keď sa tieto ramená dostali do rovnobežnej polohy medzi sebou na jednej priamke a tým boli pohyblivá a základová doska najďalej od seba a zároveň bola uzatvorená forma. To znamená, že aj sily od kĺbového mechanizmu boli taktiež na jednej priamke avšak zákonom akcie a reakcie opačne orientované.

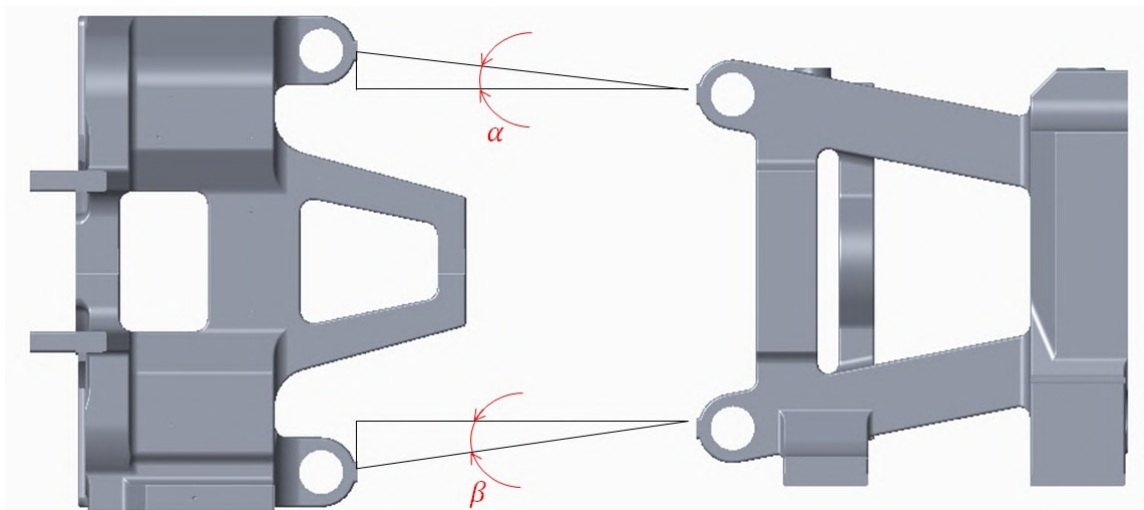


Obr. 7.16: Detail spodných ramien kĺbového mechanizmu KM200

Pozície jednotlivých dosiek v čase uzatvorenia formy boli dodané konštrukčným oddelením. Pomocou goniometrických funkcií a súradníc, ktoré boli zistené v programe Creo Parametric, boli určené jednotlivé uhly a následne prepočítané sily, ktoré pôsobili na tieto dosky.

Pri vstrekolise KM200 horizontálna vzdialenosť v hornej časti medzi platňami pri maximálnej uzatváracíj sile je 796,25 mm. Vertikálna vzdialenosť v hornej časti platní je 85 mm. Z toho vyplýva, že uhol α sa dá vyjadriť ako:

$$\alpha_{200} = \arctan \frac{85}{796,25} = 6,093^\circ \quad (7.7)$$



Obr. 7.17: Zobrazenie uhlov na vstrekolise KM200, pod ktorými pôsobia sily na dosky

V dolnej časti bola vodorovná vzdialenosť medzi doskami 792,27 mm a zvislá vzdialenosť 85,012 mm. Uhol β je rovný:

$$\beta_{200} = \arctan \frac{85,012}{796,27} = 6,125^\circ \quad (7.8)$$

Následne bolo možné vypočítať jednotlivé zložky síl, ktoré sa neskôr zadávali ako silové okrajové podmienky do programu Ansys. Keďže bola využitá symetria, bolo počítané len s polovičnou silou u oboch dosiek. Sila pôsobiaca na vrchnú časť pohyblivej dosky bola zadaná do výpočtu pomocou zložiek v smere osi Y a Z a mala hodnotu:

$$F_{200\text{horna}Y} = \frac{F_{200}}{4} \cdot \tan(\alpha) = 500000 \cdot \tan(6,093^\circ) = -53372,8N \quad (7.9)$$

$$F_{200\text{horna}Z} = \frac{F_{200}}{4} = 500000N \quad (7.10)$$

Na dolnú časť pohyblivej dosky pôsobila sila od kĺbového mechanizmu o veľkosti:

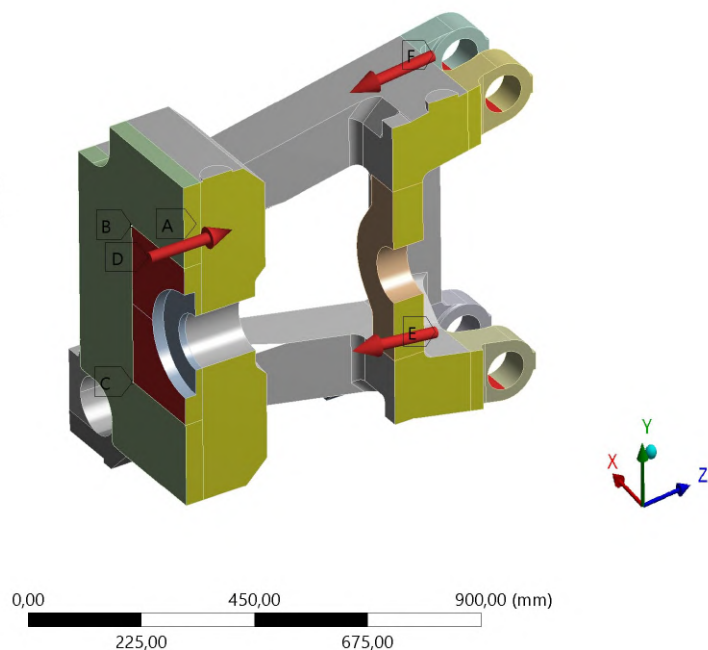
$$F_{200\text{dolna}Y} = \frac{F_{200}}{4} \cdot \tan(\alpha) = 500000 \cdot \tan(6,125^\circ) = 53655,3N \quad (7.11)$$

$$F_{200\text{dolna}Z} = \frac{F_{200}}{4} = 500000N \quad (7.12)$$

Všetky okrajové podmienky sú zobrazené na Obr. 7.18

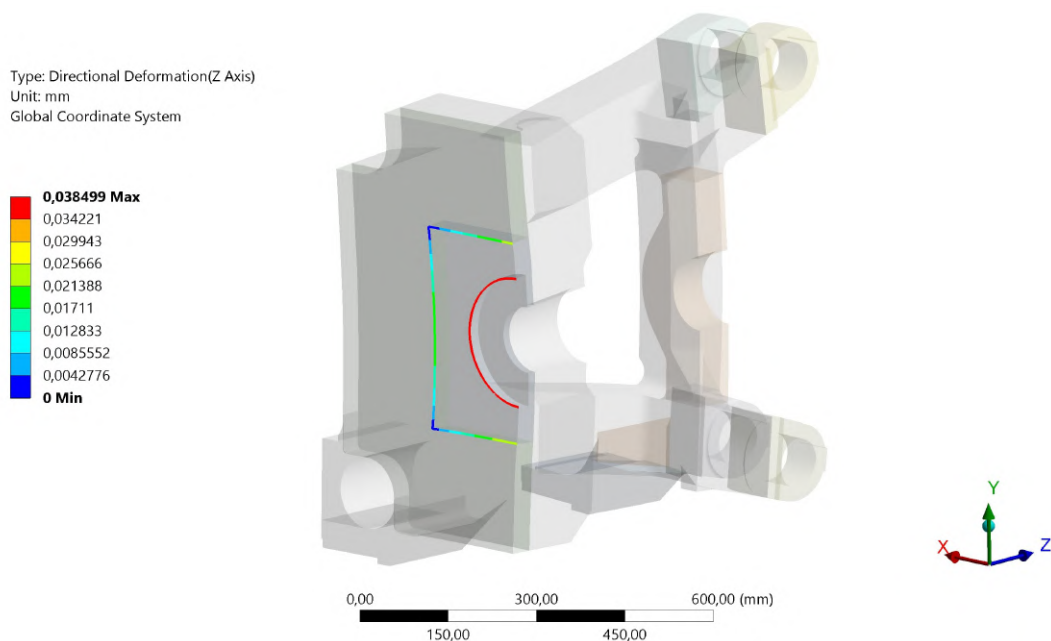
Static Structural

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Displacement 3
- D** Force: 1,e+006 N
- E** Force 2: 5,0287e+005 N
- F** Force 3: 5,0284e+005 N



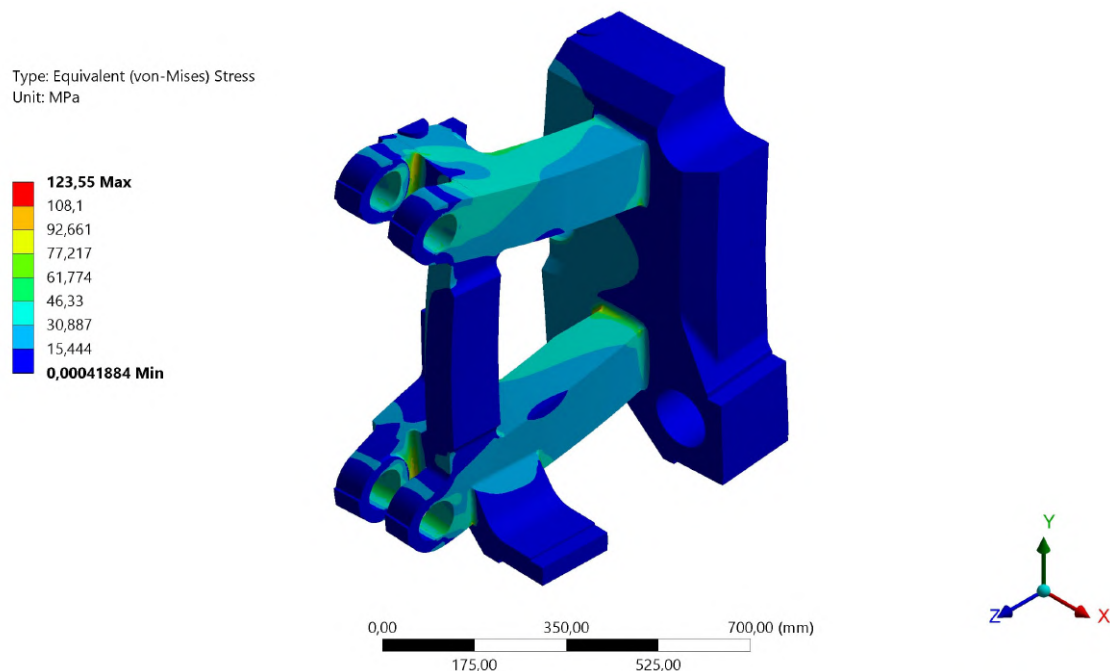
Obr. 7.18: Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM200

Na Obr. 7.19 je možné vidieť deformáciu v smere osi Z . Z hľadiska kontroly MS deformácie bol zvolený rovnaký postup a zároveň aj kritické hodnoty posuvov ako u pevnej dosky. Odvodenie a určenie kritických hodnôt deformácie je odvodené v kapitole 7.1.



Obr. 7.19: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM200

Maximálne dovolené napätie v pohyblivej doske bolo taktiež 145 MPa . Na Obr 7.20 je zobrazené napätie pohyblivej dosky pri uzatvorení formy s maximálnou uzatváracou silou.



Obr. 7.20: Redukované napätie v pohyblivej dosky KM200

Maximálna hodnota redukovaného napätia sa nachádza len lokálne na veľmi malom mieste na ostrej hrane. V praxi je táto ostrá hrana zaoblená, takže skutočné napätie je nižšie.

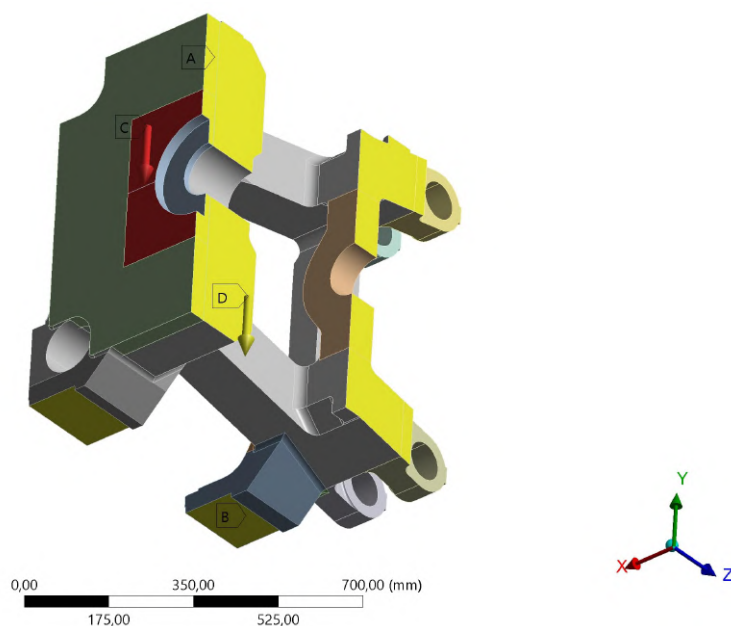
Druhým záťažným stavom pohyblivej dosky bolo rovnako ako u pevnej dosky hmotnosť polovice formy. Hmotnosť polovice formy je odvodená v predchádzajúcej podkapitole. Zvolený bol rovnaký algoritmus výpočtu a kontrola voči kritickej hodnote 145 MPa ako u pevnej dosky.

Ako aj u pevnej dosky, tak statická analýza pohyblivej dosky bola zduplikovaná a tým geometria, materiál a sieť boli totožné ako s prvým záťažným stavom

Okrajové deformačné podmienky boli predpísané tak, že podmienka *DISPLACEMENT A* zamedzovala posuv v smere osi X , keďže bola taktiež využitá symetria. Okrajová podmienka *DISPLACEMENT B* bola predpísaná na plochy, kde sa táto doska priskrutkováva na vozíky s presným lineárnym vedením. Táto OP zamedzovala posuv vo všetkých smeroch. Zatažujúca sila, ktorá predstavovala hmotnosť formy, bola predpísana pomocou funkcie *REMOTE FORCE* a jej hodnota bola taktiež stanovená v predchádzajúcej kapitole. Ďalej bola zadaná okrajová podmienka zahrňujúca vplyv gravitácie taktiež v zápornom smere osi Y . Na Obr. 7.21

Static Structural

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Remote Force: 5886, N
- D** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²

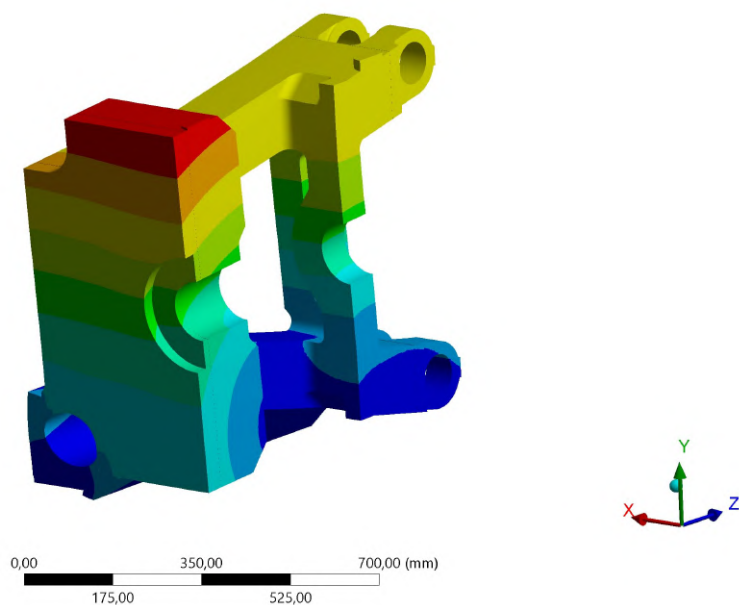


Obr. 7.21: Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

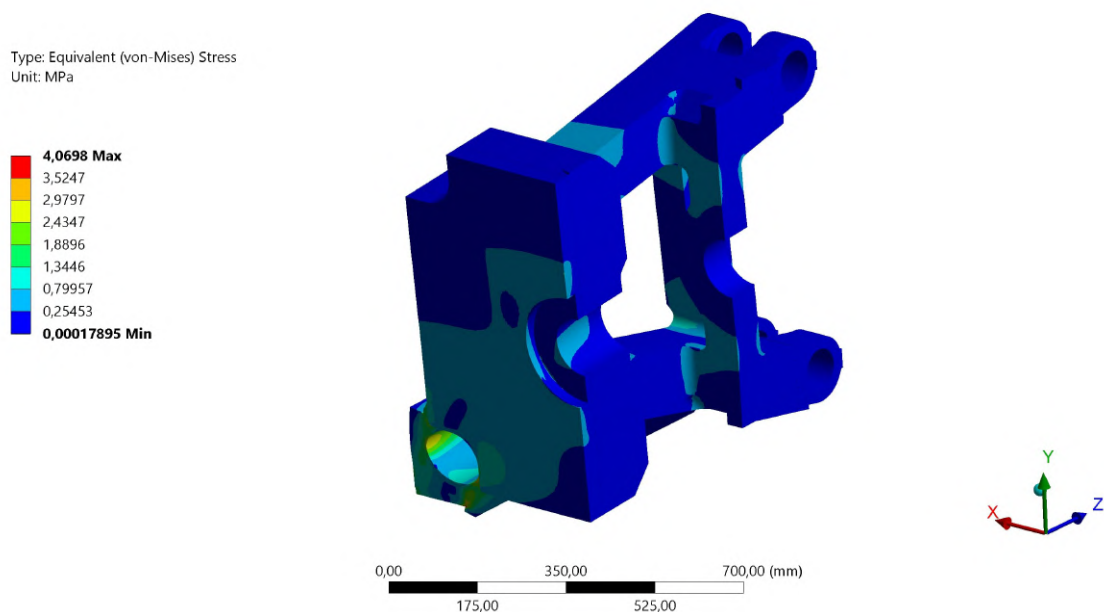
Následne bola vykreslená celková deformácia a ekvivalentné napätie podľa HMM.

Type: Total Deformation
Unit: mm

- 0,0069567 Max**
- 0,0061837
- 0,0054108
- 0,0046378
- 0,0038648
- 0,0030919
- 0,0023189
- 0,0015459
- 0,00077297
- 0 Min**



Obr. 7.22: Deformácia pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave



Obr. 7.23: Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

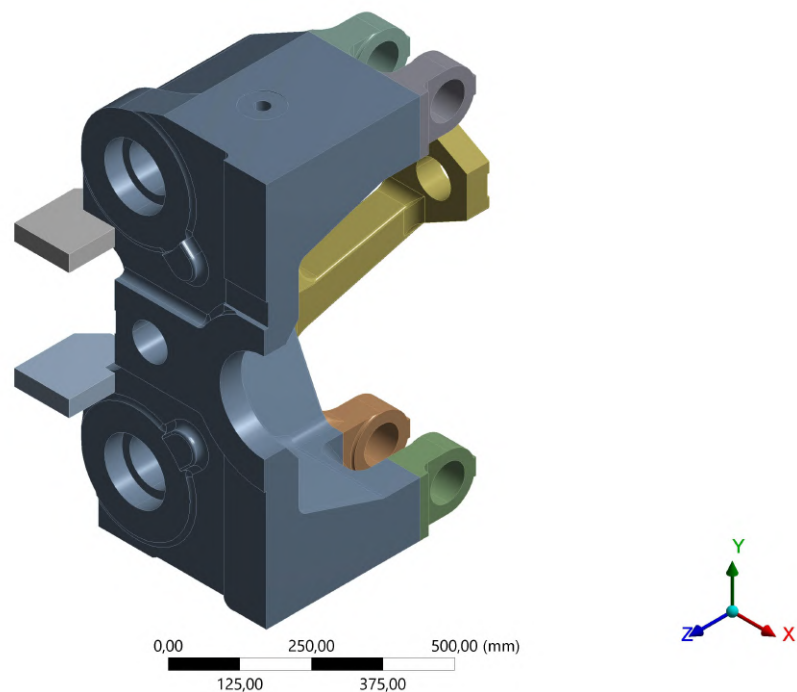
Ako u pevnej dosky tak aj u pohyblivej dosky tento druhý záťažný stav nebol kritický v porovnaní s prvým záťažným stavom a tak sa táto statická analýza nebrala do úvahy pri následnej topologickej optimalizácii, avšak následný výsledný tvar bol taktiež kontrolovaný aj na tento záťažný stav.

7.3 Základová doska

Táto doska je taktiež nazývaná ako oporná. Model geometrie dodaný firmou KraussMaffei bol takmer symetrický. Rozdiel bol len vo "výstupkoch", na ktoré sa v jednom prípade upínal motor na pohyb ozubených kolies, ktoré slúžia na posun kĺbového mechanizmu, a na opačnej strane zas držiak na uzubené koleso. V prednej časti základovej dosky je veľa funkčných objemov, resp. výstupkov, ktoré musia byť zachované. Na opačnej strane dosky bola doska tvarovaná tak, aby bolo možné umiestniť na základovú dosku vedenie kĺbového mechanizmu. Zároveň doska mala taký tvar, aby bolo možné posúvať tzv. kĺbovým krížom, ktorý bol napojený na vedenie a na samotné ramená kĺbového mechanizmu. Kvôli tomu mala táto doska určitý špeciálny tvar.

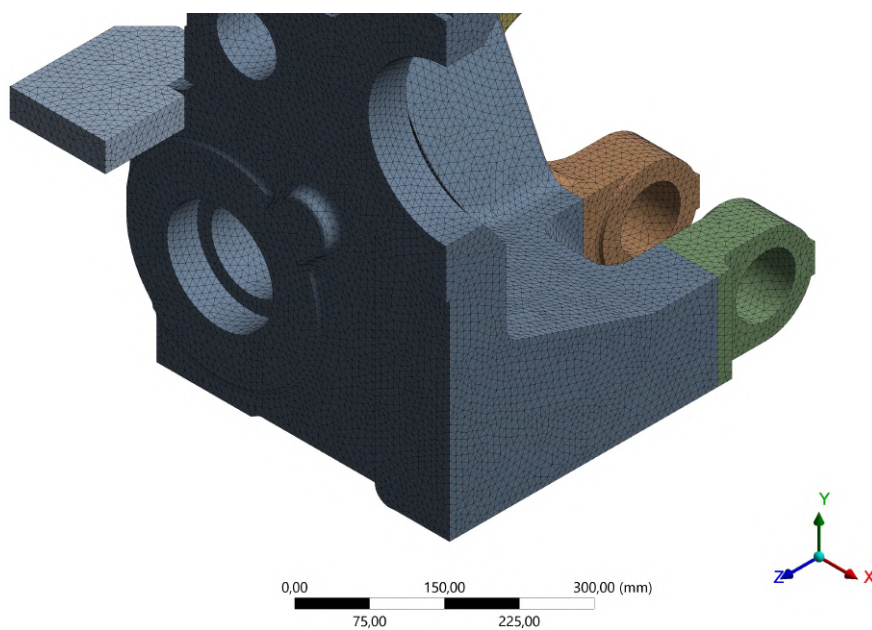
Napriek tomu, že tento tvar nebol úplne symetrický, bola využitá symetria z dôvodu, že tieto rozdielne výstupky neboli nijako zaťažené a pri statickej analýze pri maximálnej uzatváracej sile tieto výstupky neplnili žiadnu funkciu a to znamená, že neboli takmer vôbec zaťažované. Rovnako sa táto geometria rozdelila na viac podobojemov, ktoré sa neskôr nezahrňovali do TO. Polovica základovej dosky mala hmotnosť 711 kg. Model geometrie už rozdelený na jednotlivé podobojemy je možné vidieť na Obr. 7.24.

Model materiálu bol rovnaký ako u pohyblivej a pevnej dosky. Vygenerovaná sieť bola tvorená tetraedrickými kvadratickými prvkami *SOLID187*. Veľkosť prvku bola 9 mm. Veľkosť prvku 8 mm nedokázal program Ansys vytvoriť. Možný dôsledok bol zle rozrezaný objem na viac podobojemov, resp. ďalší možný dôvod bol veľmi malé skosenia uprostred otvorov pre vodiace valce. Toto skosenie však nebolo možné odstrániť ani v programe Creo



Obr. 7.24: Geometria základovej dosky KM200

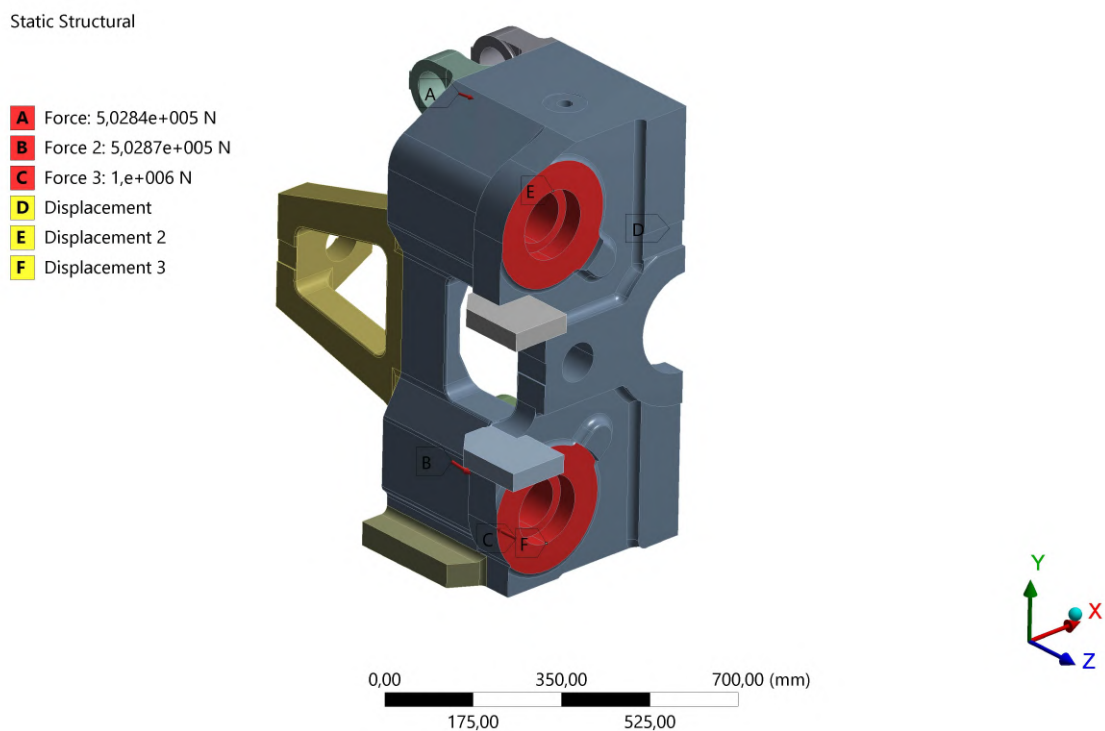
ani v SpaceClaim. Na tejto doske bolo viac menších rádiusov, ktoré nebolo možné odstrániť. Ani jeden z CAD softvérov totiž nedokázal dopočítať ostré hrany alebo by tieto hrany neboli spojité. Na Obr. 7.25 je možné vidieť detail siete základovej dosky. Táto sieť obsahovala 1 536 679 uzlov a 1 090 417 prvkov.



Obr. 7.25: Detail siete základovej dosky KM200

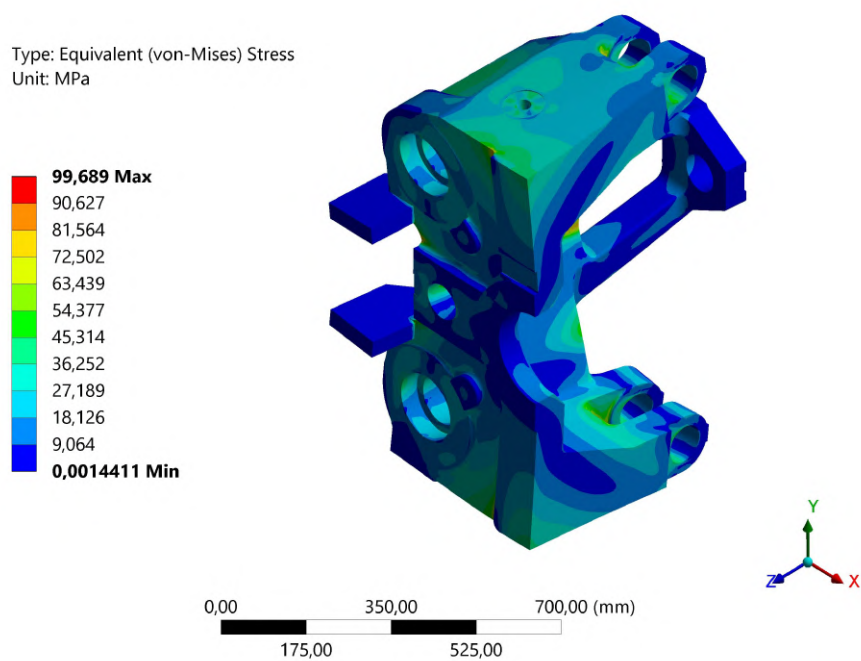
Pri využití symetrie bola predpísaná okrajová podmienka *DISPLACEMENT D* na plochy rezu a táto okrajová podmienka zamedzovala posuv v smere osi *X*. Bolo potrebné zadať ešte nejaké okrajové podmienky v smere osi *Y* a *Z*, keďže podľa Obr. 7.3 sa sily od kĺbového mechanizmu a sily prenášajúce sa cez vodiace valce vyrušia. Tieto okrajové podmienky boli zvolené v jednom prípade na horný bod diery, kde sa pripája vrchná vodiaca tyč resp. sa vodiaca tyč pripája na základovú dosku cez bronzové púzdro vložené do tejto diery a druhý bod bol naopak na spodnej časti diery, kde sa pripája dolná vodiaca tyč. Na vrchný bod bola predpísaná okrajová podmienka *DISPLACEMENT E* a zamedzovala posuv v smere osi *Z*. Na dolný bod sa predpísala okrajová podmienka *DISPLACEMENT F*, ktorá predpisovala nulový posuv v smere osi *Y* a *Z* viď Obr: 7.26

Silové okrajové podmienky vychádzali z Obr. 7.3. To znamená, že cez vodiace valce sa prenášala sila o veľkosti 500 000N cez jeden vodiaci valec. Od kĺbového mechanizmu sa prenášala rovnaká veľkosť sily ako na pohyblivú dosku len smer tejto sily bol presne opačne. Veľkosti síl ako aj uhly, pod ktorými pôsobili sily od kĺbového mechanizmu, boli odvodené v predchádzajúcich kapitolách. Sily, ktoré pôsobili od kĺbového mechanizmu boli predpísané taktiež na oká ako v prípade pohyblivej dosky. Všetky deformačné aj silové okrajové podmienky je možné vidieť na Obr. 7.26.

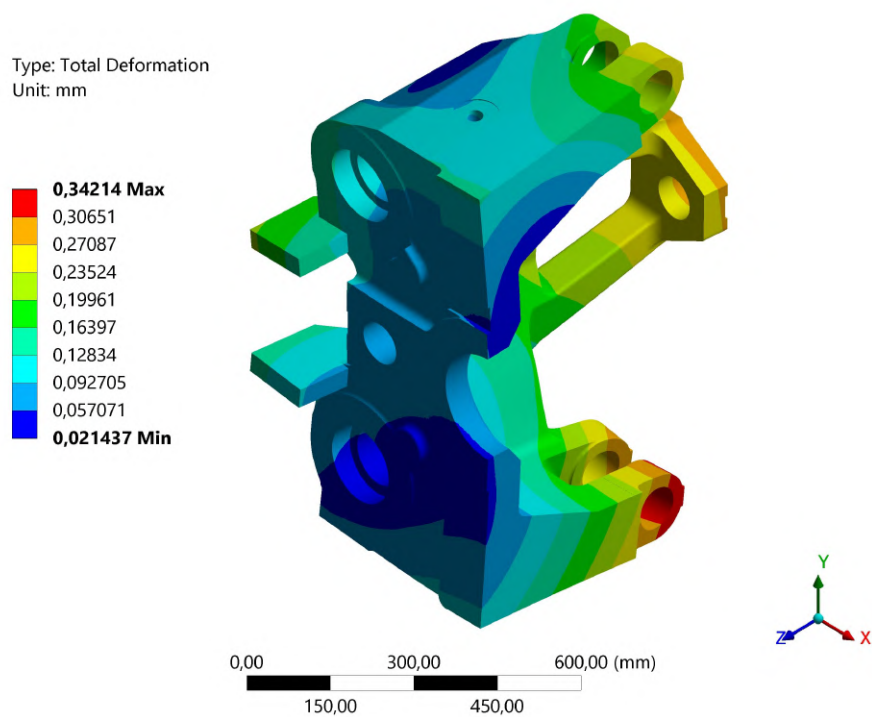


Obr. 7.26: Okrajové podmienky základovej dosky KM200

U základovej dosky neboli predpísané žiadne kritické hodnoty posuvov. Z tohto dôvodu bolo potrebné kontrolovať len maximálne redukované napätie, ktoré nemôže prekročiť hodnotu 145 MPa podobne ako u pevnej a pohyblivej dosky. Na Obr. 7.27 je zobrazené redukované napätie podľa HMH pri maximálnej uzatváracíj sile a na Obr. 7.28. je vykreslená celková deformácia.



Obr. 7.27: Redukované napätie základovej dosky KM200



Obr. 7.28: Celková deformácia základovej dosky KM200

Najväčšie napätie sa opäť nachádzalo na ostrej hrane, ktorá v skutočnosti je zaoblená. Toto miesto je aj v blízkosti oddelenia objemu výstupku, na ktorý sa montoval motor, od objemu, ktorý mal byť optimalizovaný.

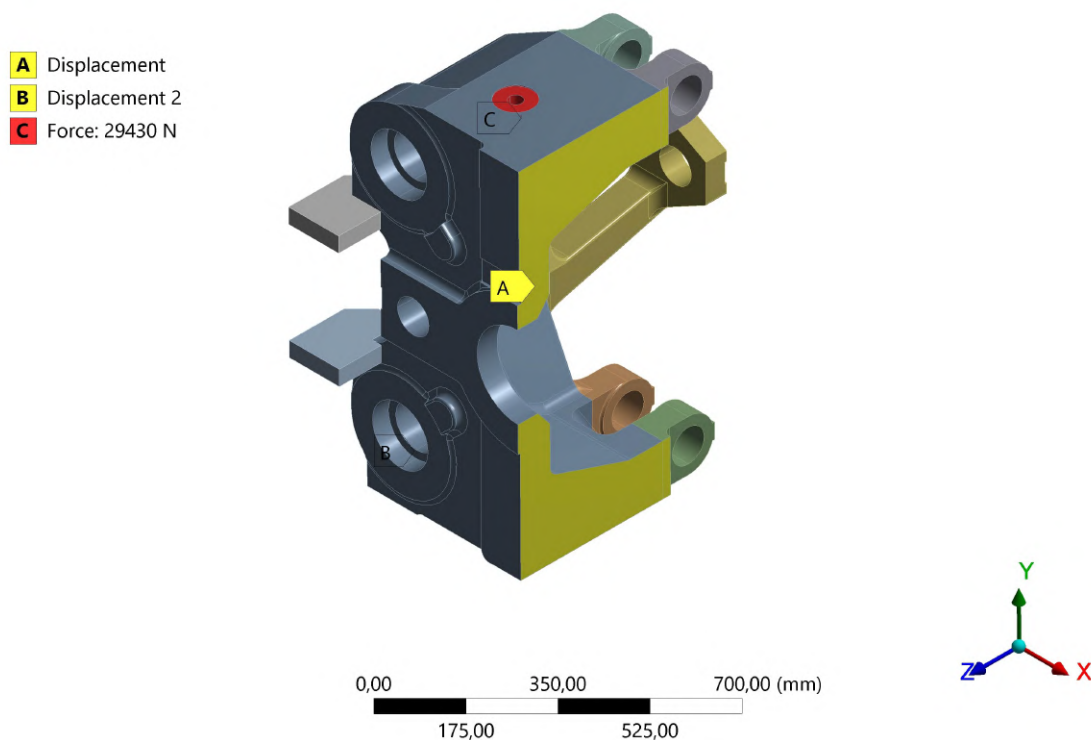
Druhým záťažným stavom bola hmotnosť vstrekolisu, keďže pri transporte a montáži sa celý vstrekolis zavesí za oká žeriavu a tieto oká sú priskrutkované v hornej časti základovej dosky. Druhý koniec vstrekolisu je zavesený v mieste vstrekovacej jednotky. Vzdialenosti medzi závitovými otvormi na oká žeriavu na základovej doske a vstrekovacej jednotke sú vyvrtané tak, aby laná žeriavu prenášali rovnakú hmotnosť. To znamená, že z celkovej hmotnosti stroja prenáša základová doska polovicu hmotnosti a v prípade využitia symetrie len štvrtinu hmotnosti celého vstrekolisu. Hmotnosť vstrekolisu KM200 je 12 ton. Z toho vyplýva, že sila ktorá je predpísaná na túto dieru má veľkosť:

$$F_{G.stroj200} = \frac{12}{4} \cdot 1000 \cdot 9,81 = 29430N \quad (7.13)$$

Táto sila pôsobila v kladnom smere osi Y.

Pri využití symetrie bola predpísaná okrajová podmienka *DISPLACEMENT A* na plochy rezu symetrie, ktorá zamedzovala posuv v smere osi X. Druhá okrajová deformačná podmienka *DISPLACEMENT C* bola predpísaná na spodnú plochu, kde sa táto doska priskrutkovala na základový strojový stôl. Okrajové silové aj deformačné podmienky druhého záťažného stavu základovej dosky je možné vidieť na Obr.7.29.

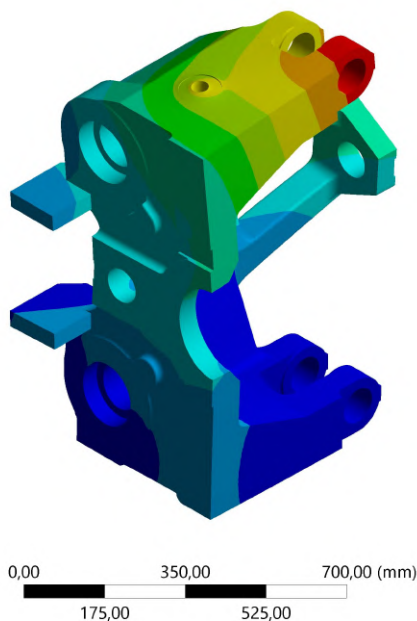
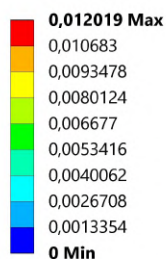
Static Structural



Obr. 7.29: Okrajové podmienky základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

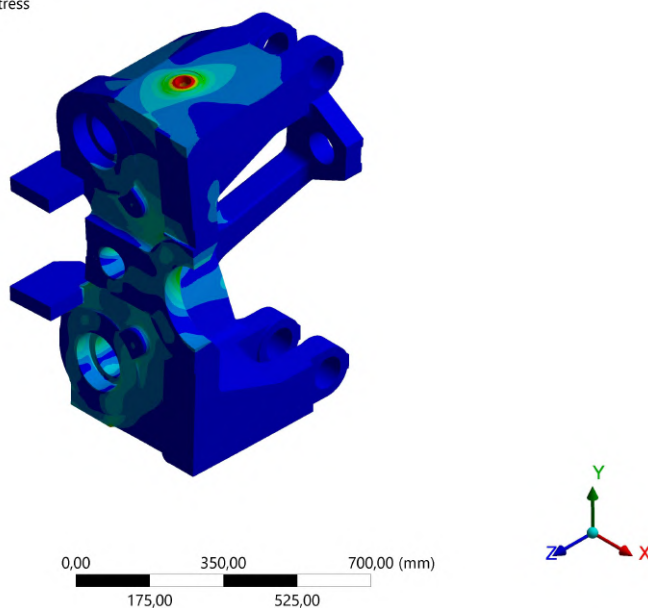
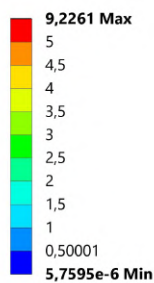
Následne bolo možné vykresliť celkovú deformáciu a redukované napätie podľa podmienky von Mises.

Type: Total Deformation
Unit: mm



Obr. 7.30: Celková deformácia základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. 7.31: Redukované napätie základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave

Aj v tomto prípade druhý záťažný stav nie je kritický vzhľadom k prvému záťažnému stavu, kedy je vyvíjaná na dosky maximálna uzatváracia sila. Preto ani u tejto dosky následná TO nemala žiadnu väzbu na druhý záťažný stav, avšak výsledný tvar bol neskôr kontrolovaný aj na takéto zaťaženie.

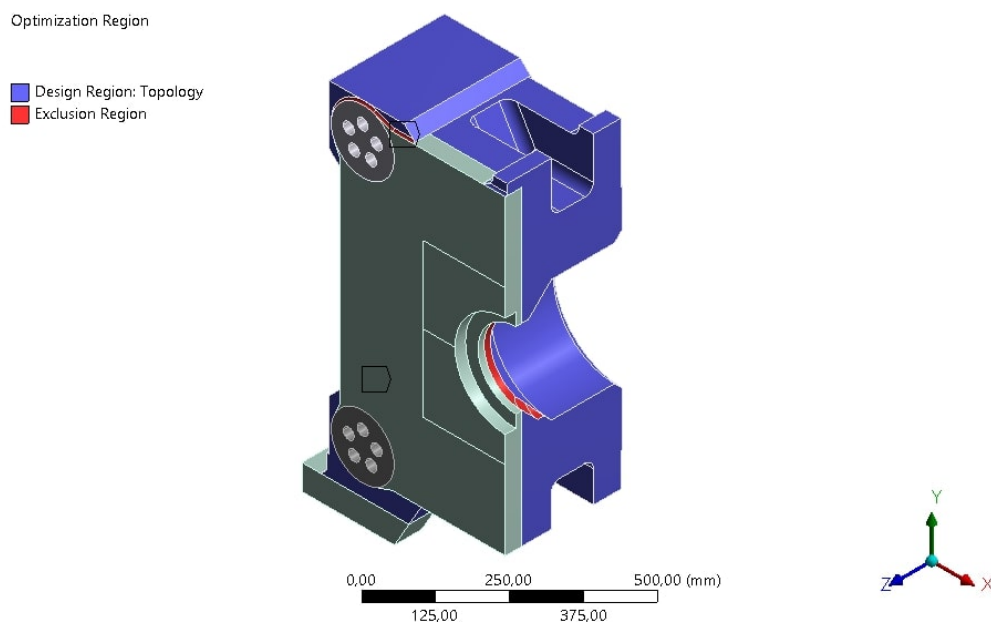
Kapitola 8

Topologická optimalizácia dosiek

8.1 Topologická optimalizácia pevnej dosky KM200

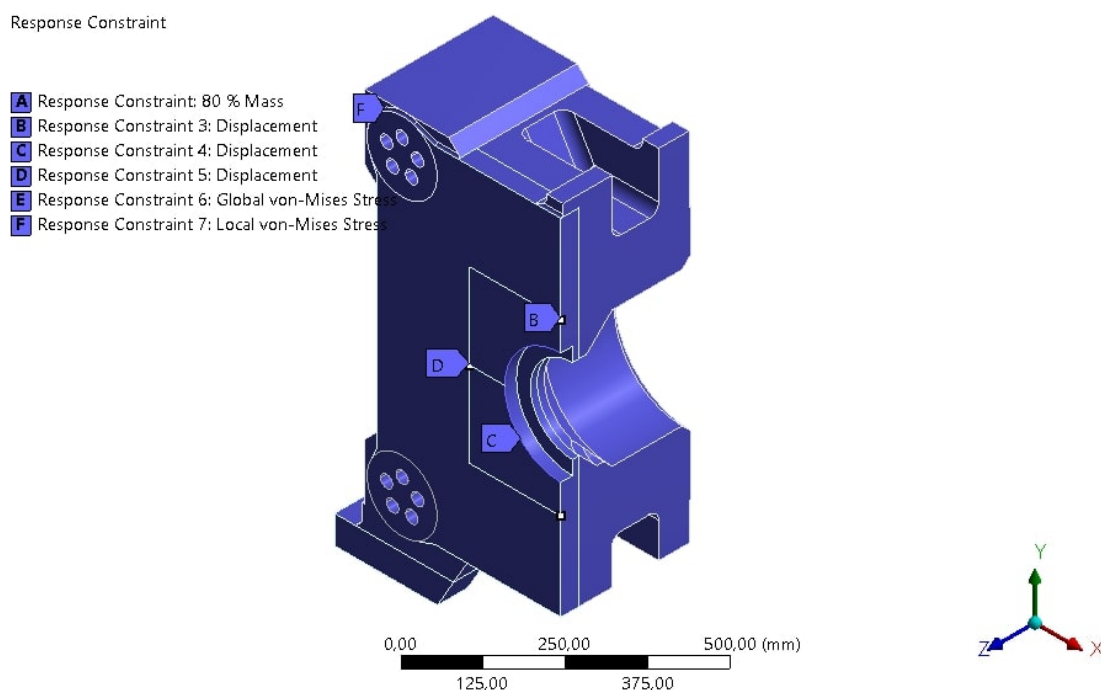
Statická analýza (prvý záťažný stav) bola potrebná pre nasledujúce nastavenie topologickej optimalizácie pevnej dosky KM200.

V sekcii *Analysis Setting* boli nastavené preddefinované hodnoty. V časti *Optimization Region* bol zadáný podobjem, ktorý sa mal optimalizovať, keďže niektoré objemy z dôvodu funkčnosti museli ostať zachované. Jednalo sa o objem, kde sa pripínala forma, o objem, kde sa primontovávala platňa k montážnemu stolu, a o objemy, na ktoré sa montovali vodiace tyče. Ďalej sa pomocou funkcie *EXCLUSION REGION* vybrali plochy, ktoré taktiež nemohli byť optimalizované. Boli to plochy, na ktoré sa montovali určité montážne diery, ako aj všetky plochy, ktoré sa dotýkali objemov, ktoré nemohli byť optimalizované. Objem znázornený fialovou farbou bol optimalizovaný viď Obr.8.1.



Obr. 8.1: Znázornenie objemov pevnej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO

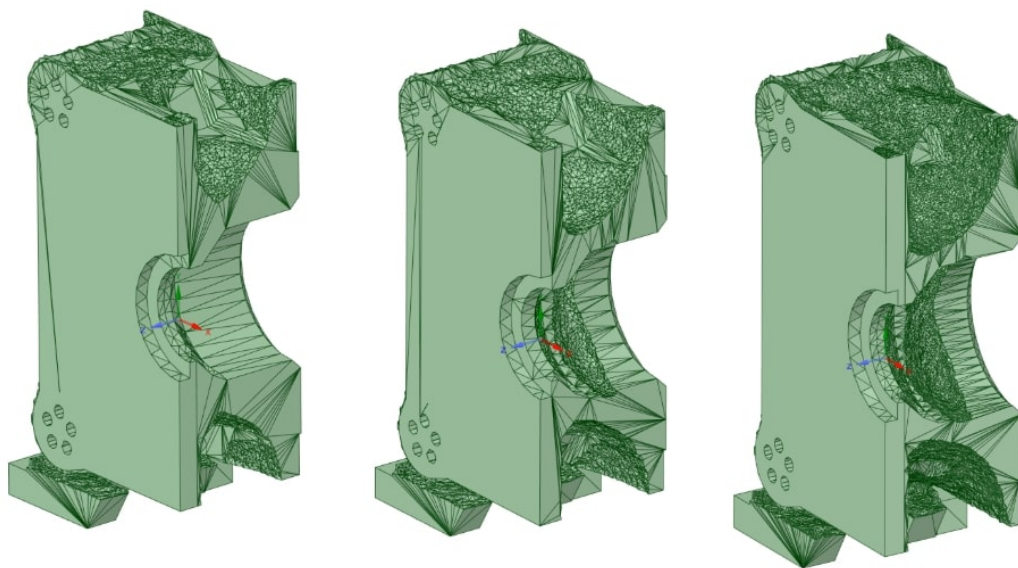
Objektívna funkcia bola taktiež preddefinovaná programom Ansys na Compliance. Následne boli zadané väzby modelu tzv. Constrains. Bola zadaná hmotnostná väzba modelu *MASS* na 80%. Následne boli zadané 3 deformačné väzby v smere osi *Z*. Prvou boli posuvy 2 bodov na horizontalnej hrane v mieste symetrie na hodnotu 0,059 mm. Druhou väzbou bol posuv celej okrúhlej hrany do veľkosti 0,066 mm. Poslednou deformačnou väzbou bol maximálny posuv bodu medzi okrajovými podmienkami *DISPLACEMENT D* a *DISPLACEMENT E* do 0,055 mm. Všetky kritické hodnoty posuvov boli odvodené už v statickej analýze. Nakoniec bola predpísaná napäťová väzba, kedy maximálna hodnota redukovaného napätia v celej platni mohla byť 145 MPa. Väzby modelu je možné vidieť na Obr. 8.2



Obr. 8.2: Constrains pevnej dosky KM200

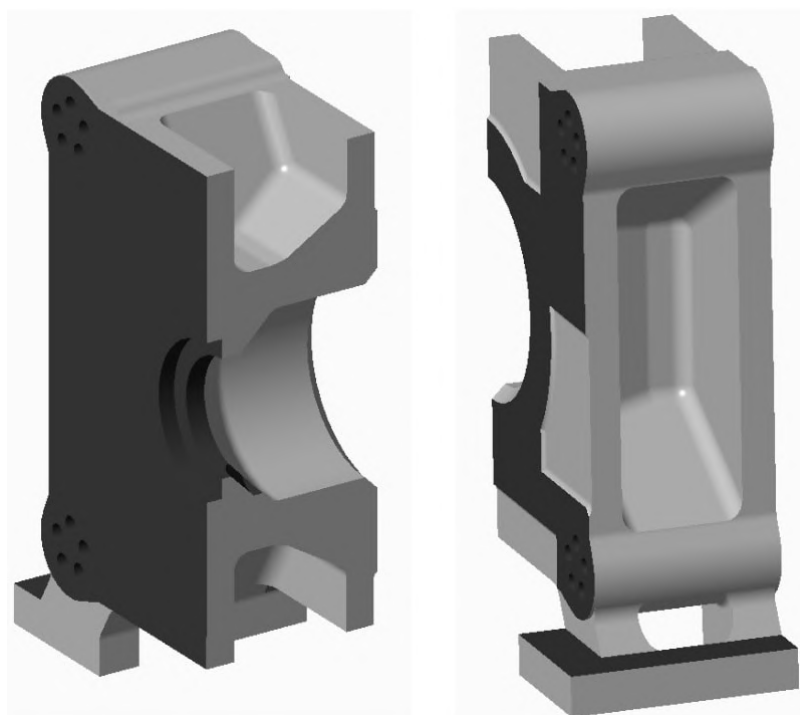
Jedným z cieľov práce bolo vytvorenie topologickej optimalizácie vo viacerých stupňoch odobratia materiálu. Tento cieľ bol dodržaný tak, že sa skopírovalo celé nastavenie topologickej optimalizácie a predefinovala sa väzba modelu *MASS* na 70% a potom na 60%. Výsledné tvary sú zobrazené na Obr. 8.3, kedy bola nastavená hodnota hustoty prvkov pomocou funkcie *Retained Threshold* na 0,5 u všetkých stupňoch odobratia materiálu ako aj neskôr u všetkých typoch dosiek.

Ako je vidieť na Obr.8.3 výsledné tvary obsahovali množstvo ostrých hrán a priveľmi veľký počet plôch. Tieto ostré hrany bolo možné upraviť už priamo v programe Ansys, konkrétne v SpaceClaim. Pri vyhladení ostrých hrán však vznikali ďalšie veľmi malé plochy. Tento postup je výhodný pri malých objemoch telesa, kedy sa výsledný komponent alebo súčiastka vyrába napr. 3D tlačiarňou. Takto veľké dosky sú vyrábané technológiou odlievania. Z tohto dôvodu bolo výhodnejšie vytvoriť model geometrie v *CAD* programe priamo pomocou rôznych vysunutí, dier a pod. z pôvodnej dosky. Na vytvorenie modelu z výsledkov bol použitý program Inventor ale aj Creo Parametric. Model geometrie bol vytvorený inžinierskym spôsobom z výsledkov, kde bolo nastavená väzba modelu *MASS* 60% tak, že



Obr. 8.3: Výsledky z topologickej optimalizácie pre pevnú dosku KM200 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%

boli pomocou funkcie *MEASURE* v Ansys SpaceClaim zisťované jednotlivé veľkosti dutín a veľkosť odobratia materiálu a bol zámer preniesť tieto veľkosti do upravovaného modelu. Výsledný model geometrie je možné vidieť na Obr. 8.4.



Obr. 8.4: Výsledný upravený model geometrie pevnej dosky KM200

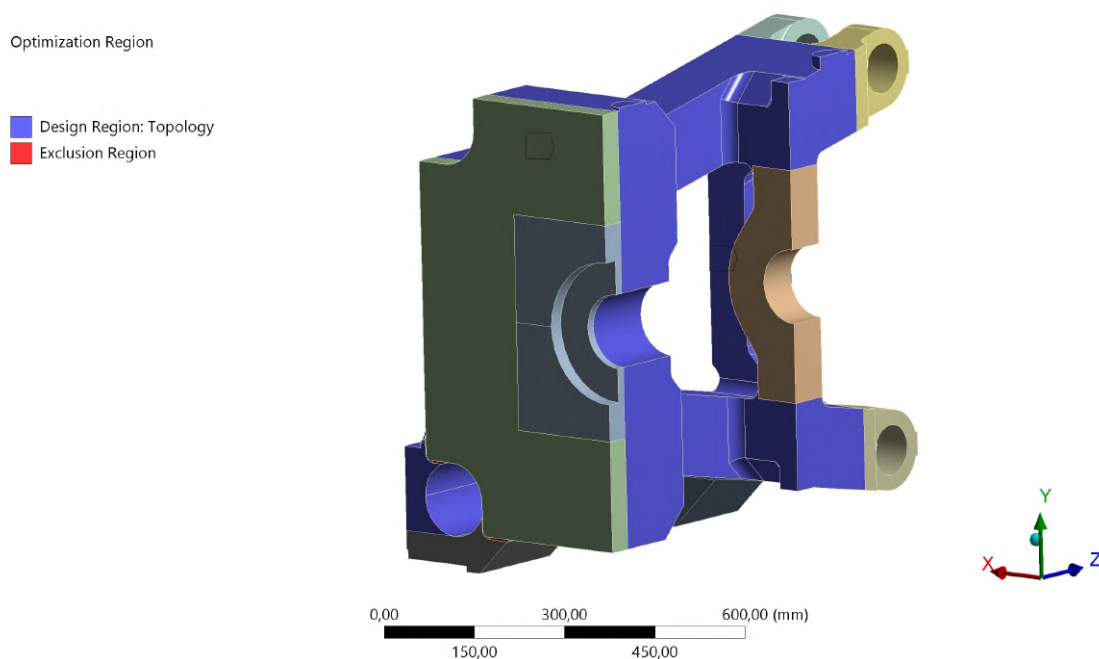
Porovnanie hmotností 3 výsledkov z Ansys SpaceClaim s výsledným upraveným modelom v *CAD* programe sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 8.1.

Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [kg]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [kg]
Pôvodná	599	100	0
SpaceClaim - 80%	521	87	78
SpaceClaim - 70%	482	81	117
SpaceClaim - 60%	443	74	156
CAD úprava	441	74	158

Tabuľka 8.1: Porovnanie hmotností výsledkov pre pevnú dosku KM200

8.2 Topologická optimalizácia pohyblivej dosky KM200

Topologická optimalizácia vychádzala zo statickej analýzy prvého záťažného stavu. Postup v nastavení TO bol rovnaký ako pri pevnej doske. Na Obr. 8.5 je fialovou farbou naznačený časť dosky ktorá bola optimalizovaná.

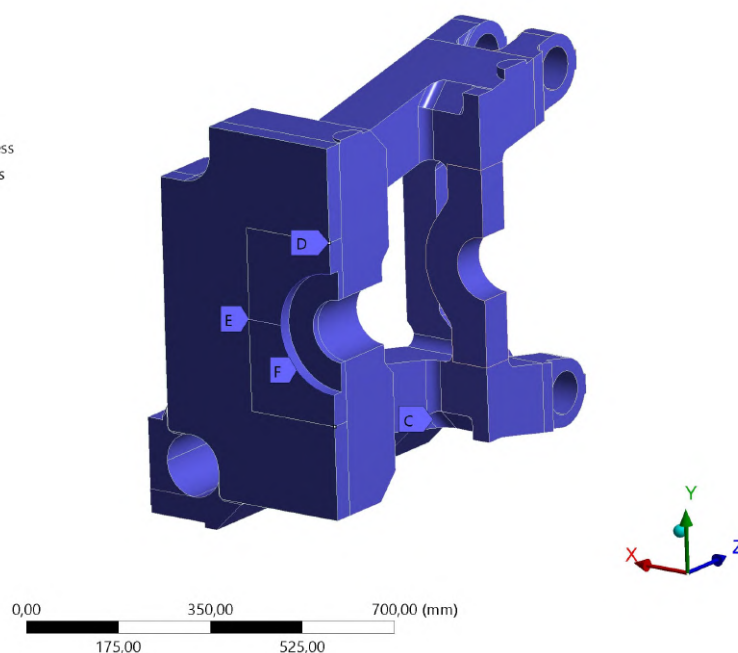


Obr. 8.5: Znázornenie objemov pohyblivej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO

Väzby modelov ako aj objektívna funkcia, ktorá bola minimalizovaná, boli rovnaké ako u pevnej dosky.

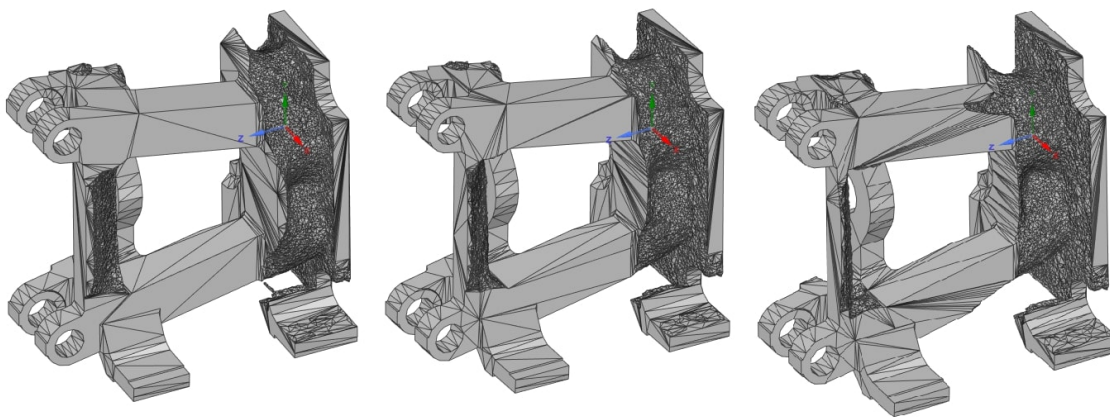
Response Constraint

- A** Response Constraint: 80 % Mass
- B** Response Constraint 2: Global von-Mises Stress
- C** Response Constraint 3: Local von-Mises Stress
- D** Response Constraint 4: Displacement
- E** Response Constraint 5: Displacement
- F** Response Constraint 6: Displacement



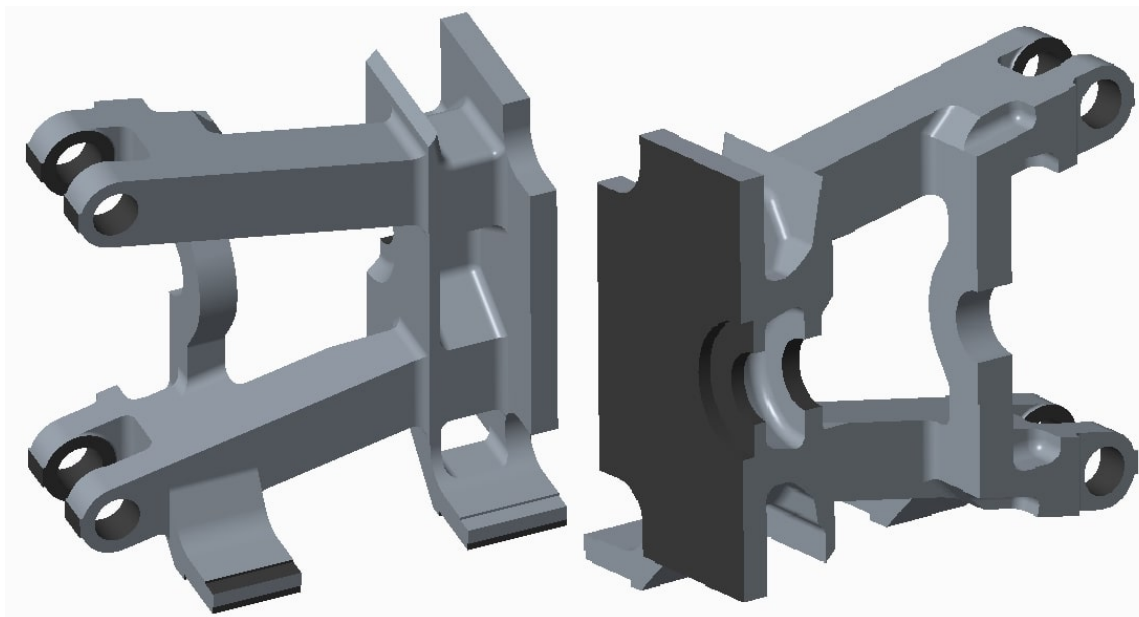
Obr. 8.6: Constrains pohyblivej dosky KM200

Aj pri tejto pohyblivej doske bol cieľ odobratia materiálu vo viacerých stupňoch vid' Obr 8.7.



Obr. 8.7: Výsledky z topologickej optimalizácie pre pohyblivú dosku KM200 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%

Zároveň bol vytvorený 3D CAD model v programe Inventor a Creo. Tento model vychádzal taktiež z výsledného tvaru, kedy bola nastavená väzba modelu *MASS* 60%



Obr. 8.8: Výsledný upravený model geometrie pohyblivej dosky KM200

Porovnanie hmotností 3 výsledkov z Ansys SpaceClaim s výsledným upraveným modelom v CAD programe sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 8.2

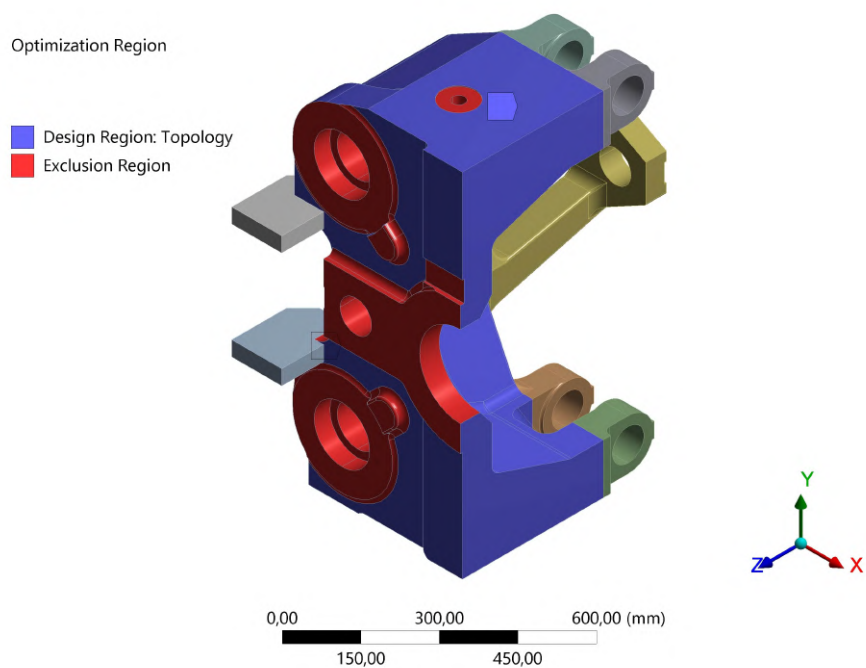
Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [kg]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [kg]
Pôvodná	683	100	0
SpaceClaim - 80%	584	86	99
SpaceClaim - 70%	533	78	150
SpaceClaim - 60%	483	71	200
CAD úprava	475	70	208

Tabuľka 8.2: Porovnanie hmotností výsledkov pre pohyblivú dosku KM200

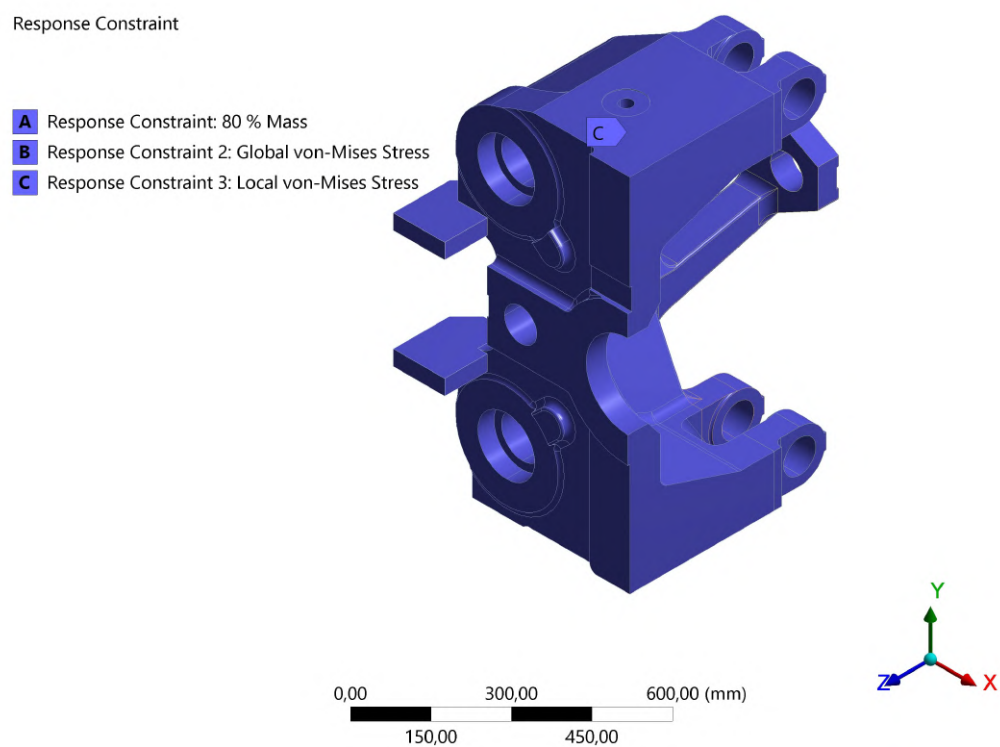
8.3 Topologická optimalizácia základovej dosky KM200

Po statickej analýze bolo možné pristúpiť k nastaveniu TO. Algoritmus nastavenia bol rovnaký ako u predchádzajúcich dvoch dosiek. Aj v tomto prípade bolo potrebné zadať objem, ktorý mal byť optimalizovaný a naopak objemy ktoré nemohli byť optimalizované. Naviac boli aj u objemu, ktorý mal byť optimalizovaný, plochy, ktoré naopak neboli zahrnuté do optimalizácie. Objem, ktorý mal byť optimalizovaný je znázornený na Obr. 8.9 fialovou farbou.

Objektívna funkcia bola predvolená programom Ansys na *Compliance*. Väzby modelu tzv. *Constrainty* boli zadávané podľa toho aký MS bol kontrolovaný. U základovej dosky bolo potrebné skontrolovať len kritickú hodnotu redukovaného napätia. Z tohto dôvodu bola u tejto optimalizácii zvolená väzba modelu dovoľujúca maximálne 145 MPa v telese a hmotnostnú väzbu na 80% resp. v nasledujúcich ďalších optimalizáciách na 70% a 60%.

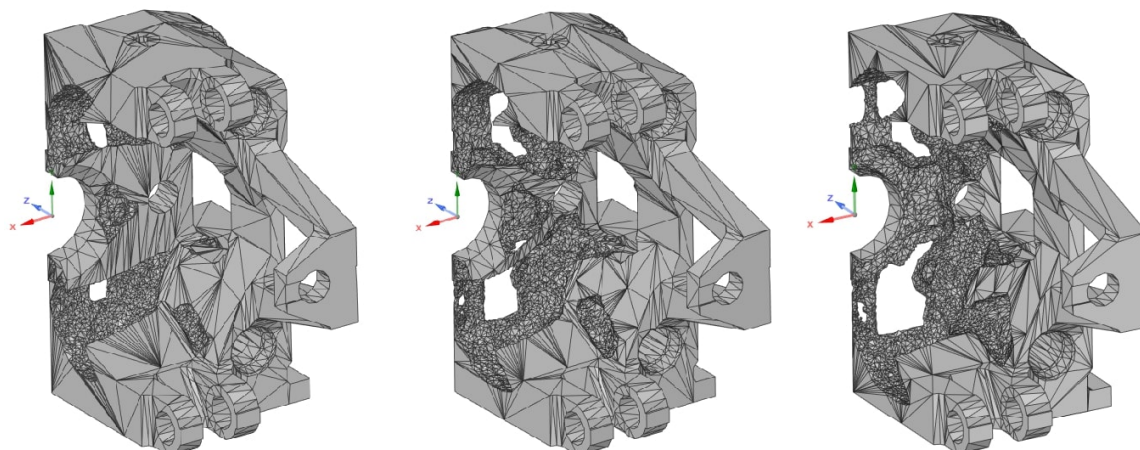


Obr. 8.9: Znázornenie objemov základovej dosky KM200, ktoré boli zahrnuté do TO



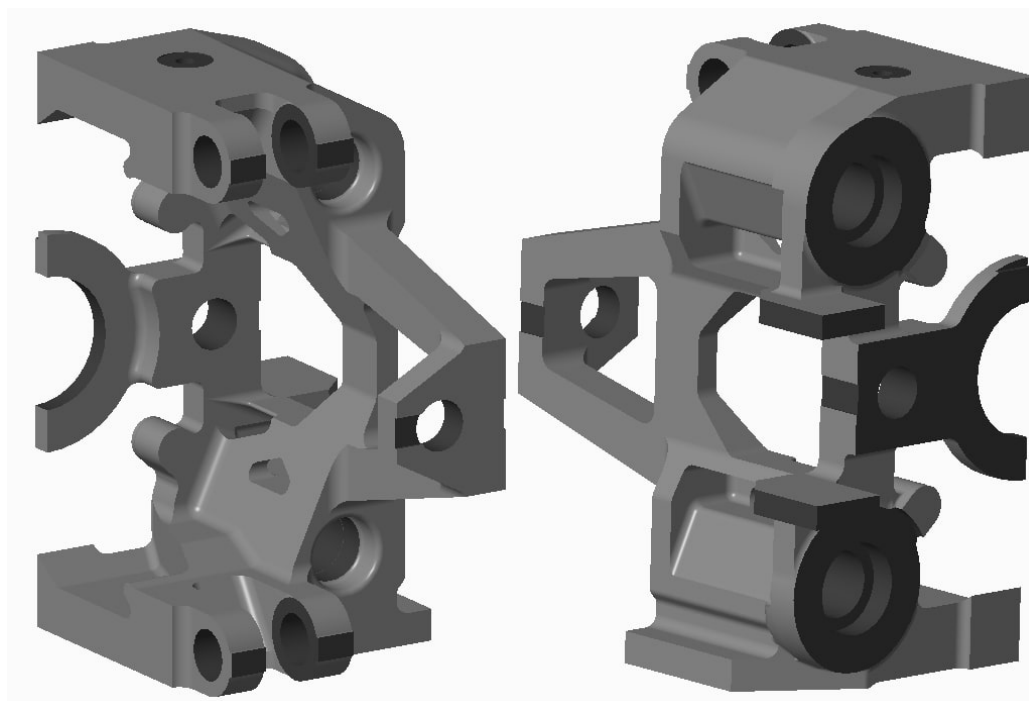
Obr. 8.10: Constraiňy základovej dosky KM200

Výsledné tvary vo viacerých stupňoch odobratia materiálu je možné vidieť na Obr. 8.11.



Obr. 8.11: Výsledky z topologickej optimalizácie pre základovú dosku KM200 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%

Tieto modely obsahovali veľmi tenké objemy a zároveň ostré hrany a tak bol vytvorený konečný *CAD* model hlavne z výsledkov z väzby modelu *MASS* 60%. V tomto modeli boli však v prednej časti, kde sa montujú jednotlivé ozubené prevody veľmi tenké plochy, do ktorých by nebolo možné navŕtať závitové diery. Preto bolo pri úprave *CAD* modelu upravené toto miesto tak, aby bolo možné navŕtať diery. Zároveň sa však tým zvýšila aj hmotnosť celej dosky.



Obr. 8.12: Výsledný upravený model geometrie základovej dosky KM200

Porovnanie hmotnosti výsledkov modelov z Ansys SpaceClaim a výsledným upraveným *CAD* modelom sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke 8.3.

Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [<i>kg</i>]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [<i>kg</i>]
Pôvodná	711	100	0
SpaceClaim - 80%	600	84	111
SpaceClaim - 70%	543	76	168
SpaceClaim - 60%	487	68	224
CAD úprava	539	75	172

Tabuľka 8.3: Porovnanie hmotností výsledkov pre základovú dosku KM200

Kapitola 9

Verifikácia výsledkov

9.1 Kontrolná statická analýza pevnej dosky KM200

Každý výsledok z topologickej optimalizácie je potrebný verifikovať. V tejto statickej analýze bol rovnaký postup ako pri prvotnej statickej analýze, bez ktorej by nebolo možné vykonať topologickú optimalizáciu.

Sieť bola tvorená taktiež kvadratickými tetraedrickými prvkami *SOLID 187* a veľkosť prvku bola upravená funkciou *BODY SIZING* na veľkosť 8 mm.

Deformačné a aj silové okrajové podmienky boli rovnaké ako v statickej analýze pri prvom a aj druhom záťažnom stave. Výsledky je možné vidieť na nasledujúcich obrázkoch.

Bezpečnosť voči MS deformácie

Prvým miestom kde sa kontroloval posuv v smere osi *Z* bol bod vrchnej resp. spodnej hrany od pôsobenia formy v mieste symetrie. Jednotlivé posuvy boli prerátané a normalizované podľa veľkosti minimálnej formy, aby bolo možné porovnávať s podmienkou $0,15 \frac{mm}{m}$ z firmy KraussMaffei, kde *l* sú jednotlivé rozmery formy v [m] a *u* sú posuvy v [mm].

$$k_{dA} = \frac{\frac{podm_{0,15}}{u_A}}{\frac{l_a}{0,39}} = \frac{0,15}{0,039} = 1,5 \quad (9.1)$$

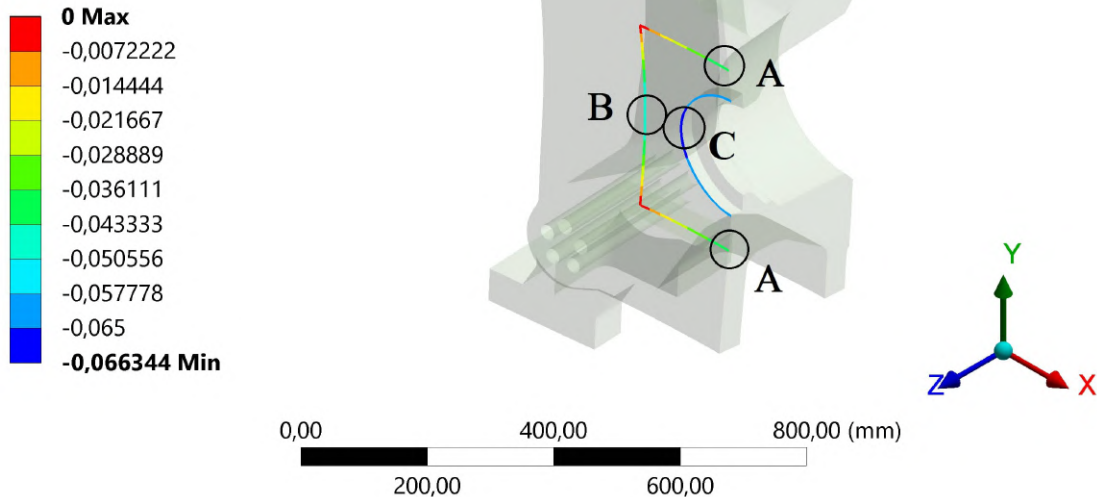
Ďalším bodom bol stred zvislej hrany medzi deformačnými okrajovými podmienkami.

$$k_{dB} = \frac{\frac{podm_{0,15}}{u_B}}{\frac{l_b}{0,365}} = \frac{0,15}{0,05} = 1,10 \quad (9.2)$$

Posledným kritickým miestom, kde bol kontrolovaný MS deformácie bola celá okrúhla hrana. V tomto prípade bola kritická hodnota $0,25 \frac{mm}{m}$. Hodnota 0,12 mm bola určená aproximáciou z posuvu na okrúhlej hrane. Táto hodnota je fiktívny posuv v strede formy.

$$k_{dC} = \frac{\frac{podm_{0,25}}{u_{C.aprox}}}{\frac{l_c}{0,534}} = \frac{0,25}{0,12} = 1,11 \quad (9.3)$$

Directional Deformation
 Type: Directional Deformation(Z Axis)
 Unit: mm
 Global Coordinate System



Obr. 9.1: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej platne KM200 výsledného modelu

Bezpečnosť voči MS maximálneho dovoleného napätia

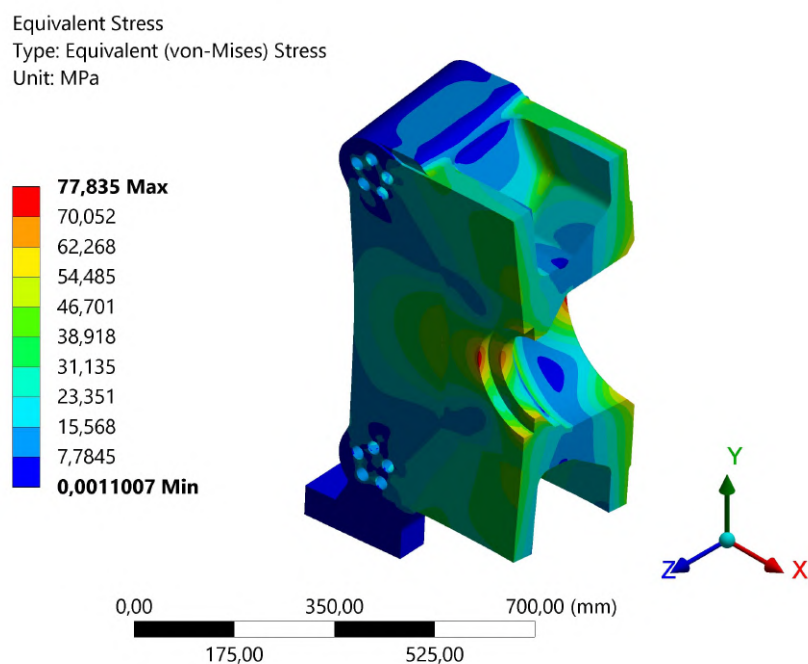
V prvom záťažnom stave bolo maximálne redukované napätie 77,835 MPa

$$k_{k1.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{78} = 1,86 \quad (9.4)$$

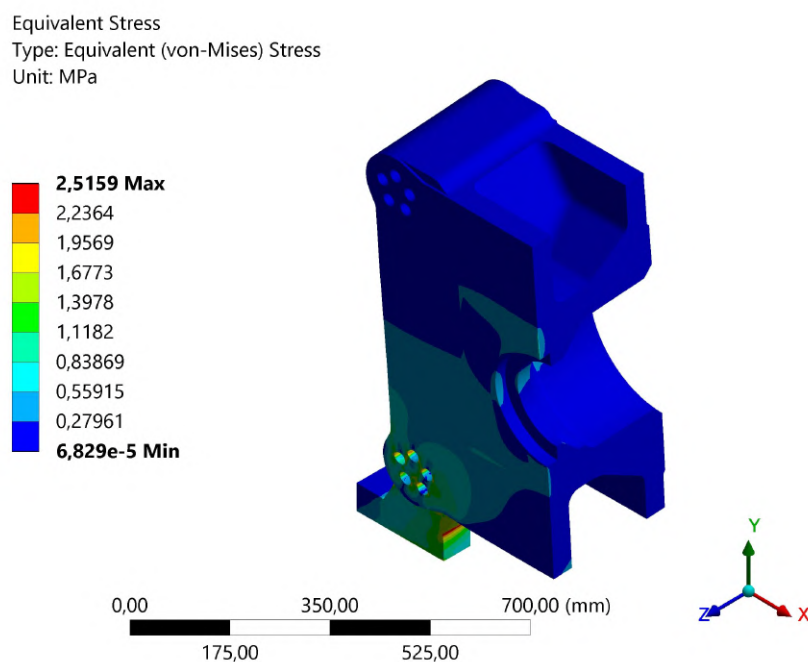
V druhom záťažnom stave bolo maximálne redukované napätie 2,516 MPa

$$k_{k2.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{2,5} = 57,54 \quad (9.5)$$

Najkritickejšia väzba modelu v topologickej optimalizácii bola *Response Constraint 4* a výpočet sa zastavil, keď bola dosiahnutá hodnota deformácie predpísaná práve v tejto podmienke v mieste C na 0,066 mm.



Obr. 9.2: Redukované napätie pevnej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

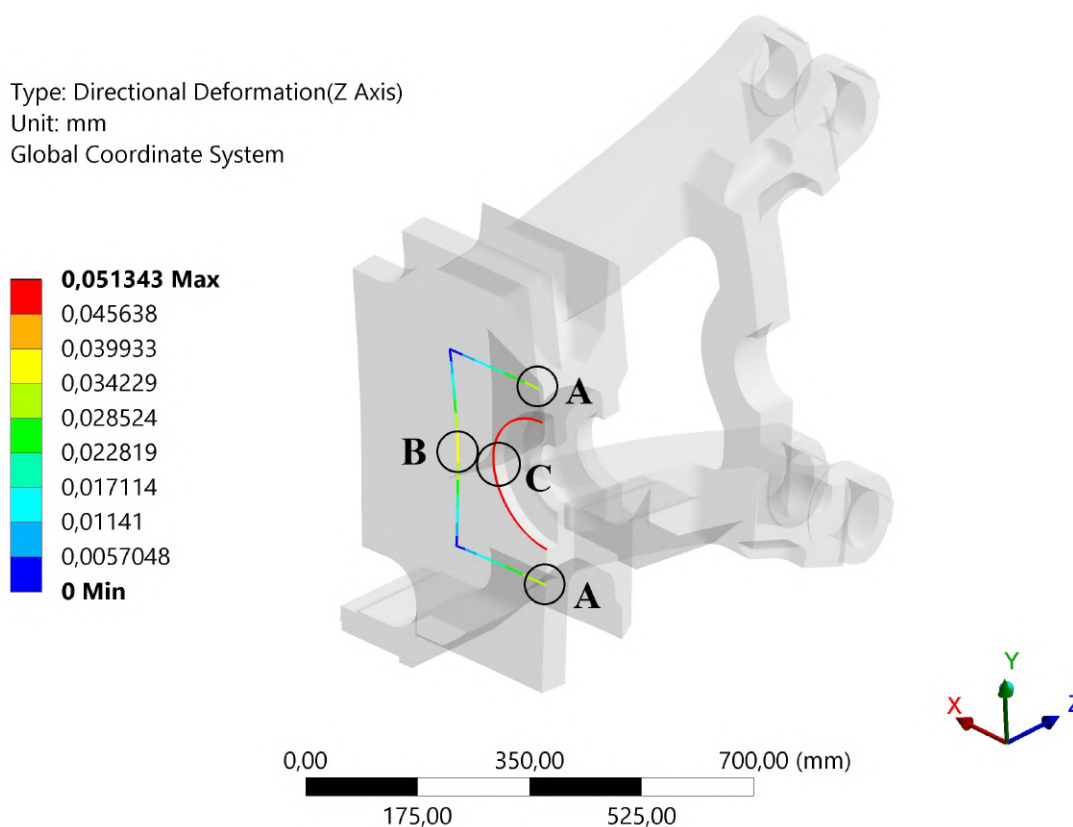


Obr. 9.3: Redukované napätie pevnej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu

9.2 Kontrolná statická analýza pohyblivej dosky KM200

Následná verifikácia výsledkov pohyblivej dosky bola vykonaná rovnakým spôsobom ako prvotná statická analýza. Sieť bola taktiež tvorená tetraedrickými prvkami *SOLID187* s veľkosťou prvku 8 mm. okrajové silové a deformačné podmienky boli predpísané taktiež rovnako ako u prvej statickej analýzy, či už pre prvý alebo druhý záťažný stav.

Bezpečnosť voči MS deformácie



Obr. 9.4: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM200 výsledného modelu

Kontrola voči MS deformácie bola vykonaná rovnakým spôsobom na rovnakých miestach ako u pevnej dosky. Prvým miestom kde sa kontroloval posuv v smere osi *Z* bol bod vrchnej resp. spodnej hrany od pôsobenia formy v mieste symetrie.

$$k_{dA} = \frac{\frac{podm_{0,15}}{u_A}}{\frac{l_a}{0,39}} = \frac{0,15}{0,033} = 1,77 \quad (9.6)$$

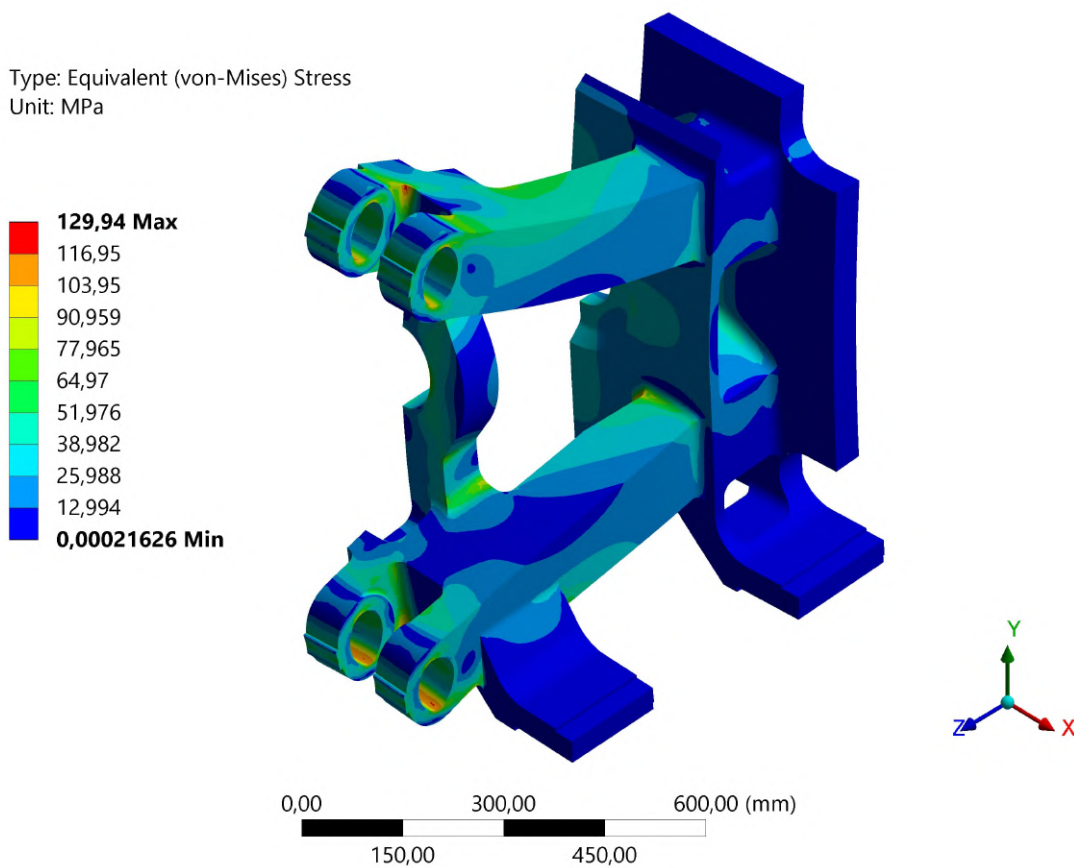
Ďalším bodom bol stred zvislej hrany medzi deformačnými okrajovými podmienkami.

$$k_{dB} = \frac{\frac{podm_{0,15}}{\frac{u_B}{l_b}}}{\frac{0,15}{0,037}} = \frac{0,15}{0,365} = 1,48 \quad (9.7)$$

Posledným kritickým miestom, kde bol kontrolovaný MS deformácie bola celá okrúhla hrana.

$$k_{dC} = \frac{\frac{podm_{0,25}}{\frac{u_{C.aprox}}{l_c}}}{\frac{0,25}{0,093}} = \frac{0,25}{0,534} = 1,44 \quad (9.8)$$

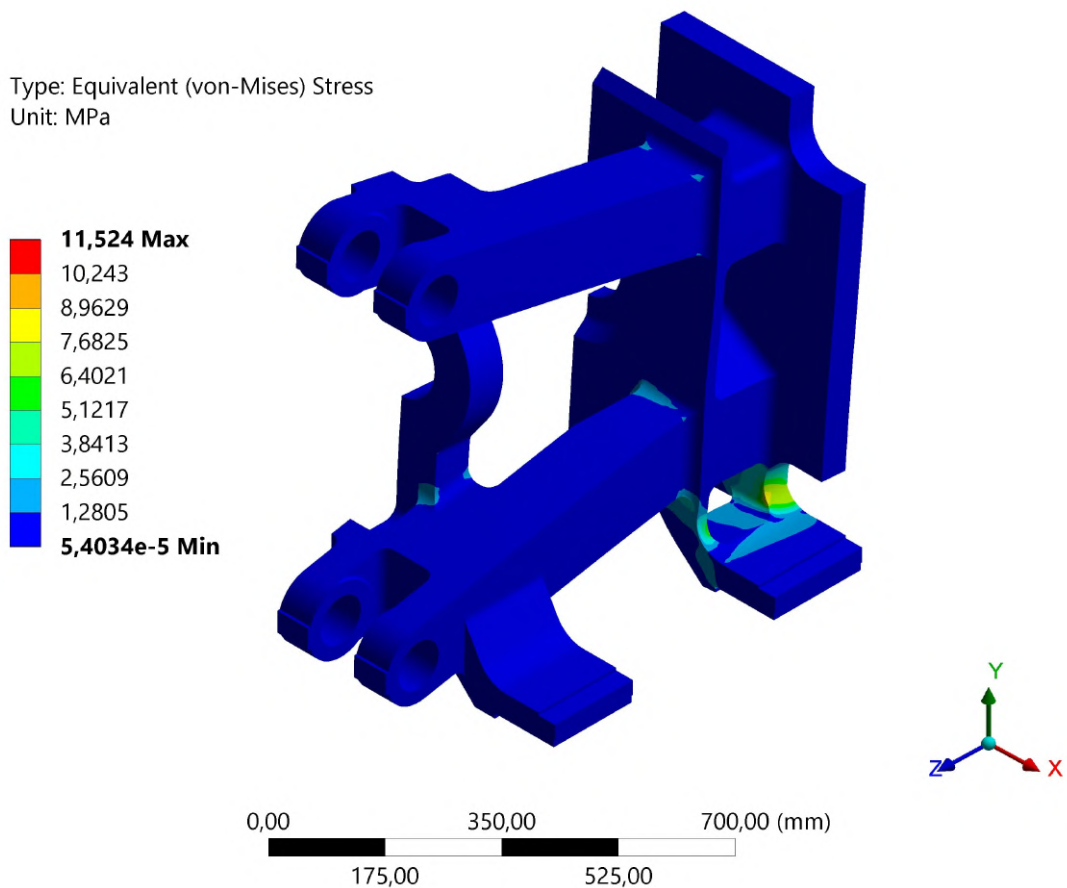
Bezpečnosť voči MS maximálneho dovoleného napätia



Obr. 9.5: Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

V prvom záťažnom stave bolo maximálne redukované napätie 129,94 MPa

$$k_{k1.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{130} = 1,12 \quad (9.9)$$



Obr. 9.6: Redukované napätie pohyblivej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu

V druhom záťažnom stave bolo maximálne redukované napätie 11,524 MPa.

$$k_{k2.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{12} = 12,08 \quad (9.10)$$

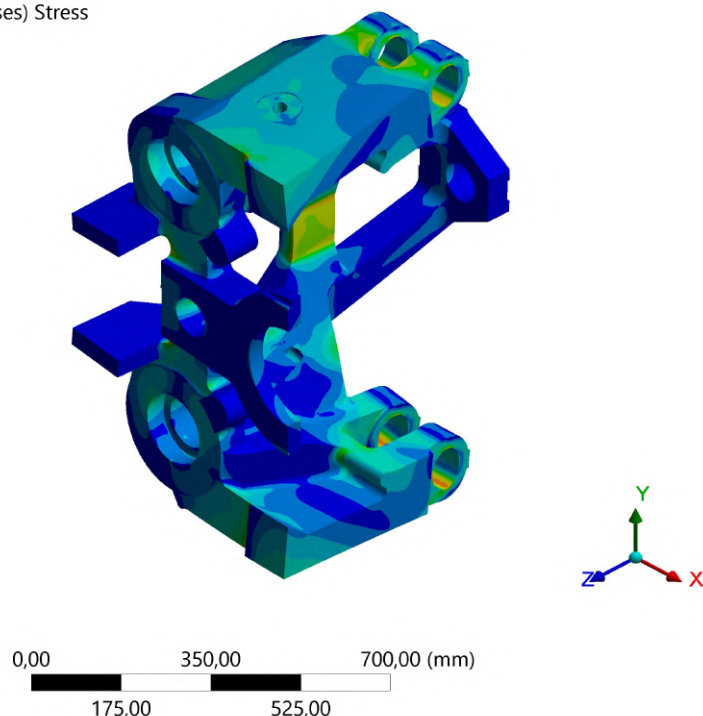
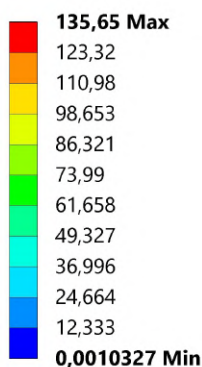
Najnižšia hodnota bezpečnosti je u MS kritickéj hodnoty napätia. Avšak maximálne napätie sa nachádza len na ostrej hrane na veľmi malej oblasti ako sú oká na uchytenie kĺbového mechanizmu. Z tohto dôvodu, nie je toto miesto veľmi kritické.

9.3 Kontrolná statická analýza základovej dosky KM200

Nakoniec bolo potrebné vykonať kontrolu výsledného navrhnutého tvaru. Statická analýza bola vykonaná rovnakým algoritmom ako statická analýza pred topologickou optimalizáciou. Sieť bola tvorená taktiež prvkami *SOLID187* s veľkosťou prvku 8 mm. Okrajové silové aj deformačné podmienky boli zadane rovnakým spôsobom ako u predošlej statickej analýzy pred topologickou optimalizáciou.

Bezpečnosť voči MS maximálneho dovoleného napätia

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. 9.7: Redukované napätie základovej dosky KM200 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

V prvom záťažnom stave bolo maximálne redukované napätie 135,65 MPa

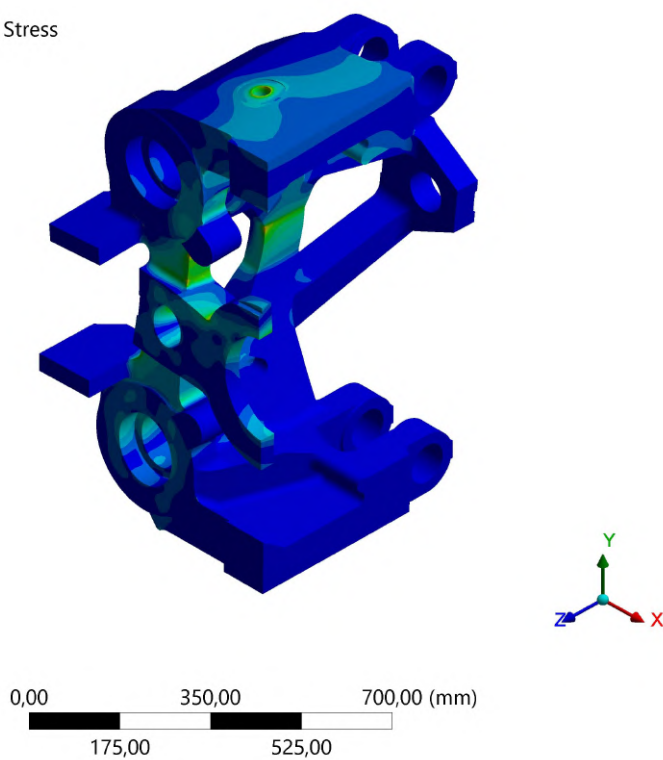
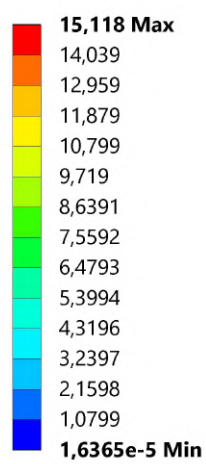
$$k_{k1.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{136} = 1,07 \quad (9.11)$$

V druhom záťažnom stave bolo maximálne napätie 15,12 MPa.

$$k_{k2.ZS} = \frac{\sigma_{dov}}{\sigma_{max}} = \frac{145}{15} = 9,67 \quad (9.12)$$

Maximálna hodnota napätia u základovej dosky sa blížila k maximálnemu dovolenému napätiu. Avšak táto hodnota napätia sa nachádzala len na veľmi malom priestore navyše taktiež na ostrej hrane, kde v skutočnosti bude vytvorený technologický rádius kvôli odliatu dosky.

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. 9.8: Redukované napätie základovej dosky KM200 v druhom záťažnom stave výsledného modelu

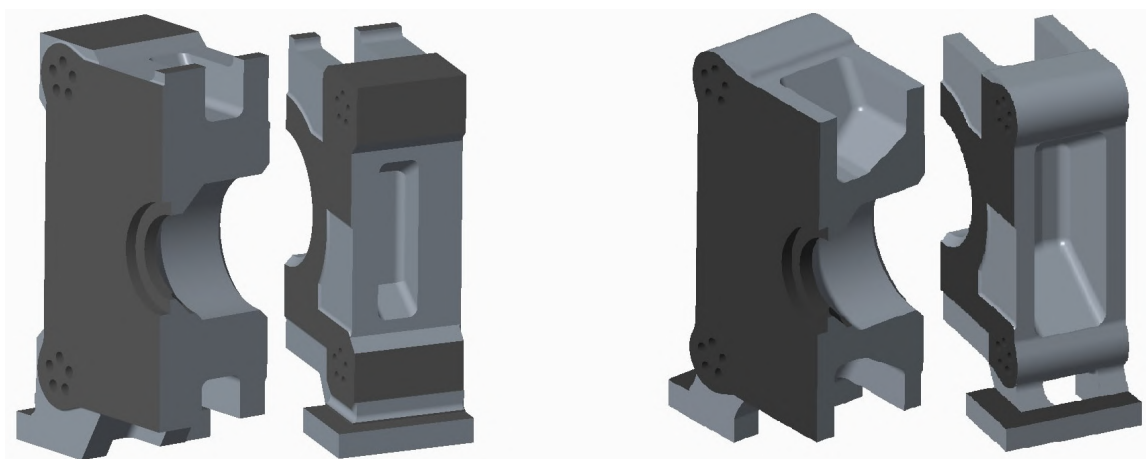
Kapitola 10

Porovnanie výsledkov

V nasledujúcich tabuľkách je porovnanie výsledkov jednotlivých dosiek pre vstrekolis KM200 vždy medzi pôvodnou a následnou upravenou geometriou zahrňujúcou výsledky z jednotlivých topologických optimalizácií. V tabuľkách sa nachádzajú porovnania hmotností celých dosiek(nie len polovice) ako aj porovnanie možných MS, ktoré boli kontrolované na jednotlivých doskách.

	Pôvod. pevná doska	Uprav. pevná doska
Hmotnosť [kg]	1198	882
Odobratie materiálu	0	-26%
Posuv A [mm]	0,031	0,039
Posuv B [mm]	0,024	0,05
Posuv C [mm]	0,05	0,066
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	69	78
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	3,1	2,5

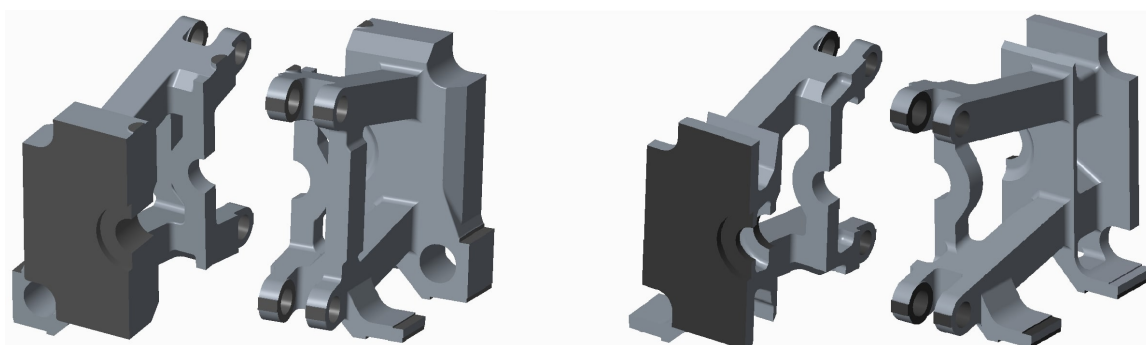
Tabuľka 10.1: Porovnanie výsledkov pre pevnú dosku KM200



Obr. 10.1: Pôvodná pevná doska (vľavo) Upravená pevná doska (vpravo)

	Pôvod. pohyblivá doska	Uprav. pohyblivá doska
Hmotnosť [kg]	1366	950
Odobratie materiálu	0	-30%
Posuv A [mm]	0,024	0,033
Posuv B [mm]	0,02	0,037
Posuv C [mm]	0,038	0,051
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	124	130
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	4	12

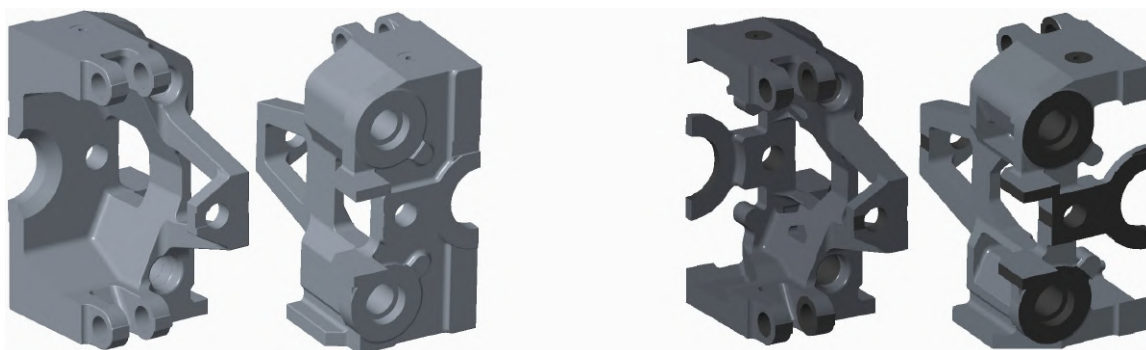
Tabuľka 10.2: Porovnanie výsledkov pre pohyblivú dosku KM200



Obr. 10.2: Pôvodná pohyblivá doska (vľavo) Upravená pohyblivá doska (vpravo)

	Pôvod. základová doska	Uprav. základová doska
Hmotnosť [kg]	1422	1078
Odobratie materiálu	0	-24%
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	124	135
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	5	15

Tabuľka 10.3: Porovnanie výsledkov pre základovú dosku KM200



Obr. 10.3: Pôvodná základová doska (vľavo) Upravená základová doska (vpravo)

Kapitola 11

Záver

Hlavným cieľom diplomovej práce bolo vytvorenie návrhu geometrie dosiek(platní) s využitím topologickej optimalizácie. Dôvodom zadania tejto práce bola veľká hmotnosť jednotlivých dosiek vstrekolisu. Tieto komponenty v uzatváracej jednotke však musia byť dostatočne pevné a tuhé aby dokázali preniesť lisovacie a vstrekovacie tlaky. Veľkosť komponentov však pri montáži a transporte prináša značné komplikácie.

V teoretickej časti boli ukázané súčasné možnosti využitia topologickej optimalizácie so softvérmí, ktoré obsahujú aj túto možnosť výpočtu. Na základe poznatkov z rešeršnej časti bolo neskôr možné vytvoriť výpočtový model dosiek vstrekolisu. Bolo potrebné zistiť všetky záťažné stavy, ktoré nastávajú na jednotlivých doskách. Výpočtové modelovanie dosiek v diplomovej práci bolo prevádzané v analógii s modelovaním vo firme KraussMaffei. To znamená, že aj prípadné MS sa kontrolovali vzhľadom k tabuľkovým hodnotám firmy, kedy tieto tabuľkové hodnoty brali do úvahy MS pružnosti, MS únavy a najmä MS deformácie u pohyblivej a pevnej dosky.

V diplomovej práci je zobrazené výpočtové modelovanie vstrekolisu KM200. Na aplikáciu topologickej optimalizácie bolo potrebné vytvoriť vždy prvotnú statickú analýzu už vyrábaných dosiek. Až následne bolo možné využiť topologickú optimalizáciu, ktorá bola riadená maximálnymi kritickými hodnotami napätí a deformácií, ktoré nemohli byť prekročené. Zároveň boli vytvorené modely geometrie vo viacerých stupňoch odobratia materiálov. Tieto výsledné tvary obsahovali množstvo ostrých hrán a tak bol vytvorený jeden výsledný 3D CAD model pre každý typ dosky. Tieto modely boli následne kontrolované D-N analýzou na vopred stanovené podmienky. Výsledná upravená pevná doska vstrekolisu KM200 bola odlahčená o 26%. Pohyblivá doska tej istej veľkosti uzatváracej jednotky vstrekolisu mala výslednú hmotnosť o 30% menšiu. Najzložitejší výsledný tvar mala základová doska a mala hmotnosť o 24% menšiu ako pôvodný dodaný model geometrie.

Firmou KraussMaffei boli dodané aj veľkosti menšej uzatváracej jednotky vstrekolisu KM50. Tieto dosky sa tvarom takmer vôbec nelíšili od väčších dosiek. Preto bol postup vytvorenia návrhu geometrie dosiek rovnaký ako u uzatváracej jednotky vstrekolisu KM200. Nastavenie prvotnej analýzy ako aj topologická optimalizácia a následná finálna kontrola týchto menších dosiek sú zobrazené v prílohách.

Všetky výsledky geometrií dosiek boli odovzdané firme KraussMaffei. Ďalším postupom pri zavedení dosiek do výroby a montáže by mala byť kontrola vyrobiteľnosti technológiou odlievania, resp. samotné technologické úpravy ako sú zaoblenia ostrých hrán, ale aj vytvorenie rôznych menších závitových dier na montovanie formy, ozubeného pohonu, rozličných elektrických káblov atď. Zároveň je potrebné zohľadniť výrobu novonavrnutých dosiek aj ekonomického hľadiska.

Literatúra

- [1] topostruct. *Sawapan.eu* [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <http://www.sawapan.eu/>
- [2] Uzavírací jednotka: Čistota a výkon spojené s vysokou přesností. In: *KUBOUŠEK: divize KraussMaffei* [online]. České Budějovice: KUBOUŠEK GROUP [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <http://www.kubousek.cz/en/kraussmaffei-division/injection-molding-machines/series-ex/clamping-unit.html>
- [3] *MSC.Nastran Topology Optimization: Optimizing Design Topology Using Your Finite Element Models*. MSC.Software Corporation. 2005, Dostupné také z.
URL https://www.mssoftware.com/assets/3154_NA2004NOVZTOPZLTDAT.pdf
- [4] *Abaqus Topology Optimization Module (ATOM): Nonlinear Structural Optimization for Improved, Rapid Product Design*. Dassault Systemes - SIMULIA. 2012, Dostupné také z.
URL https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/SIMULIA/RESOURCES/SIMULIA-Abaqus-Topology-Optimization-Module.pdf?fbclid=IwAR3eftFwD6L34RMTsjg1a2_q01MaZlov6aZSyLY-9ryPiBvO6RLbeW_B4h0
- [5] *Vstřikování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2014 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z.
URL http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [6] *Vstrekovanie plastov. DKI PLAST, s.r.o.* Žilina: DKI PLAST. 2015 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z.
URL <http://dkiplast.eu/sk/vyroba/vstrekovanie-plastov/>
- [7] Čada, Z. Topologická Optimalizace v prostředí ANSYS. *YouTube* [online]. SVS FEM. 2017, 8. 6. 2017, [cit. 2019-05-01]. Dostupné z.
URL <https://www.youtube.com/watch?v=mfI8EalLcsk>
- [8] Pareto. *SciArt Rethinking Design* [online]. Madison: SciArt Software, Inc. 2018, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://www.sciartsoft.com/pareto>
- [9] *ANSYS Help* [online]. ANSYS, Inc. 2019, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://ansyshelp.ansys.com/>

- [10] *KraussMaffei Group in Slovakia* [online]. KraussMaffei Group. 2019, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <http://www.kraussmaffeigroup.sk/sk-sk/>
- [11] What is Altair Inspire?. *Altair solidThinking* [online]. Altair Engineering. 2019, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://solidthinking.com/product/inspire/>
- [12] Z88ARION. *Z88* [online]. Bayreuth: Uni Bayreuth. 2019, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://en.z88.de/z88arion/>
- [13] Chen, L.-P.; Yang, J.; Zhang, Y.-Q.: Multiple stiffness topology optimizations of continuum structures. In: *Research Gate* [online]. London: ResearchGate,. 2005, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL https://www.researchgate.net/publication/225543730_Multiple_stiffness_topology_optimizations_of_continuum_structures
- [14] Ebnesajjad, S.: *Fluoroplastics, Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers - The Definitive User's Guide and Data Book*. Elsevier Science, druhé vydání, 2015, ISBN 9781455731978.
- [15] Hale, S.: What is Topology Optimization and Why Use It?. *CAE Associates* [online]. CAE Associates,. 2017, May 22, 2017, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://caeai.com/blog/what-topology-optimization-and-why-use-it>
- [16] Kecík, S.: *Návrh a pevnostní kontrola montážního přípravku pro stacionární montáž vozíků lineárního vedení uzavírací jednotky vstříkolisu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2017.
- [17] Mareš, T.: *Základy konstrukční optimalizace*. Praha: Ústav mechaniky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické, svazek ii vydání, 2006, ISBN 80-239-6508-5.
URL <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [18] Štěpánek P.: Čo je topologická optimalizácia?. *Stepanek3D* [online]. 2018, 11. októbra 2018, [cit. 2019-05-02]. Dostupné z.
URL <https://stepanek3d.sk/co-je-topologicka-optimalizacia/>
- [19] Seidl, M.: *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. [online]. Liberec: Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016 [cit. 2019-05-02], ISBN 978-80-88058-71-7, Dostupné z.
URL <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [20] Smolík, J.: *Topologická optimalizace nosných dílců*. Praha: Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze.
- [21] Ulrich, J.: *Optimalizace technologických parametrů vstřikování plastového dílce*. Brno. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2014.
- [22] Zeman, L.: *Vstřikování plastů*. Praha: Grada Publishing, první vydání vydání, 2018, ISBN 978-80-271-0614-1.

- [23] Čada, Z.: SVS FEM Webinář: Ansys Topological Optimization. *YouTube* [online]. SVS FEM. 2016, 29. 9. 2016, [cit. 2019-05-01]. Dostupné z.
URL https://www.youtube.com/watch?v=x638_9pmTZc&fbclid=IwAR0LHFqYzvNeTiZjkypqP3-pzfofET1elqJKUnd03obiIyzdiNpkVvhFevQ

Zoznam skratiek

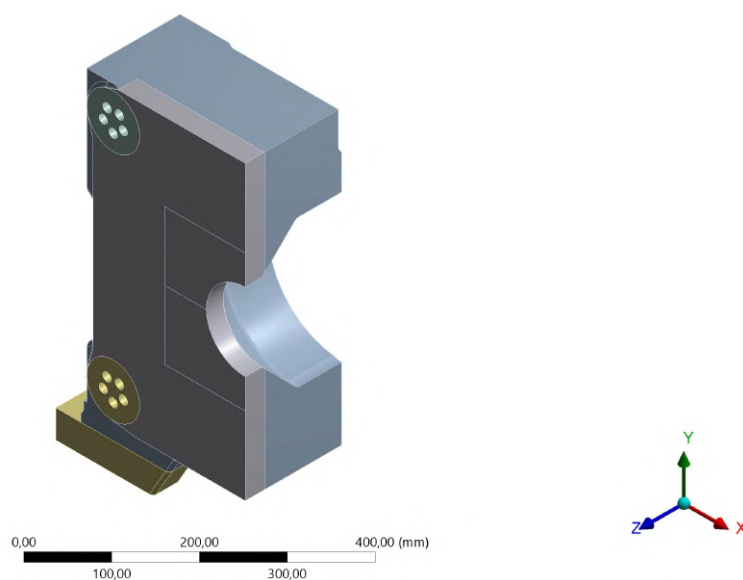
Symbol	Rozmer	Veličina
E	$[MPa]$	Youngov modul pružnosti
E_{ijkl}	$[MPa]$	tenzor tuhosti
t_0	$[mm]$	počiatočná hrúbka dosky
t	$[mm]$	meniac sa hrúbka dosky
ϱ	$[mm]$	špecifická hrúbka(hustota)
p	$[-]$	Penalty parameter
μ	$[-]$	Poissonov pomer
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota materiálu
m	$[kg]$	hmotnosť
x	$[mm]$	špecifická hrúbka(hustota)
a	$[m \cdot s^{-2}]$	zrýchlenie
g	$[m \cdot s^{-2}]$	gravitačné zrýchlenie (konštanta)
F_{200}	$[N]$	lisovacia sila vstrekolisu KM200
$F_{G.200}$	$[N]$	gravitačná sila časti formy pre vstrekolis KM200
α_{200}	$[^\circ]$	uhol pod ktorým pôsobí horná sila na pohyblivú dosku KM200
β_{200}	$[^\circ]$	uhol pod ktorým pôsobí dolná sila na pohyblivú dosku KM200
$F_{200.horna}$	$[N]$	horná pôsobiaca sila v smere osi Y a Z na pohyblivú dosku
$F_{200.dolna}$	$[N]$	dolná pôsobiaca sila v smere osi Y a Z na pohyblivú dosku
$F_{G.stroj200}$	$[N]$	gravitačná sila stroja predpísaná na dieru KM200
σ	$[MPa]$	napätie
σ_{max}	$[MPa]$	maximálne napätie
σ_{dov}	$[MPa]$	dovolené napätie
k_k	$[-]$	bezpečnosť vzhľadom k medznému stavu kritického napätia
k_d	$[-]$	bezpečnosť medzného stavu deformácie
K		matica tuhosti
u		matica posuvov
w		matica váhových funkcií

Skratka	význam
MKP	metóda konečných prvkov
FEM	Finite element method (Metóda konečných prvkov)
KM	KraussMaffei
MS	Medzný stav
CAD	Computer-aided design (Návrh pomocou počítača)
STEP	formát, ktorý podporujú takmer všetky CAD softvéry dokonca Ansys,...
D-N analýza	deformačne napäťová analýza
ÚMTMB	Ústav mechaniky telies, mechatroniky a biomechaniky
TO	Topologická optimalizácia
LO	Layout Optimization (Optimalizácia dispozície)
GSO	Generalized Shape Optimization (Zovšeobecnená optimalizácia tvaru)
ISE	Isotropic Solid or Empty element (Izotropný pevný alebo prázdny element)
ASE	Anisotropic Solid or Empty element (Anizotropný pevný alebo prázdny element)
ISEP	Isotropic Solid, Empty or Porous element (Izotropný pevný, prázdny alebo pórovitý element)
ISEC	Isotropic Solid, Empty or Composite element (Izotropný pevný, prázdny alebo kompozitný element)
ISECP	Isotropic Solid, Empty or Composite and Porous element (Izotropný pevný, prázdny alebo kompozitný a pórovitý element)
SIMP	Solid Isotropic Microstructure with Penalization method (Metóda pevnej izotropnej mikroštruktúry s penalizáciou)
OMP	Optimal Microstructure with Penalization method (Metóda optimálnej mikroštruktúry s penalizáciou)
NOM	NonOptimal Microstructures method (Metóda neoptimálnych mikroštruktúr)
OC	Optimality Criterium method (Metóda kritéria optimality)
COC	Continuum-type Optimality Criteria method (Metóda spojitého kritéria optimality)
DCOC	Discretized COC
Metóda DDP	Dual Discrete Programming
ESO	Evolutionary Structural Optimization (Evolučná konštrukčná optimalizácia)
ABG	Adaptive Biological Growth (Aditívny biologický rast)
SERA	Sequential Element Rejections and Admissions method (Metóda postupného zavrhnutia a prijatia elementov)
ATOM	Abaqus Topology Optimization Module
SKO	Soft-Kill-Option method (Metóda maximálnej stability)
TOSS	Topology Optimization for Stiffness and Stress (Optimalizácia pre minimum poddajnosti s maximálnou stabilitou)
SCP	Sequential Convex Programming
MMA	Method for Moving Asymptotes (Metóda pohybujúcich sa asymptót)
OP	okrajová podmienka
HMH	podmienka podľa Huber, von Mises, Hencky
tzv.	takzvaný
resp.	respektíve
atď.	a tak ďalej

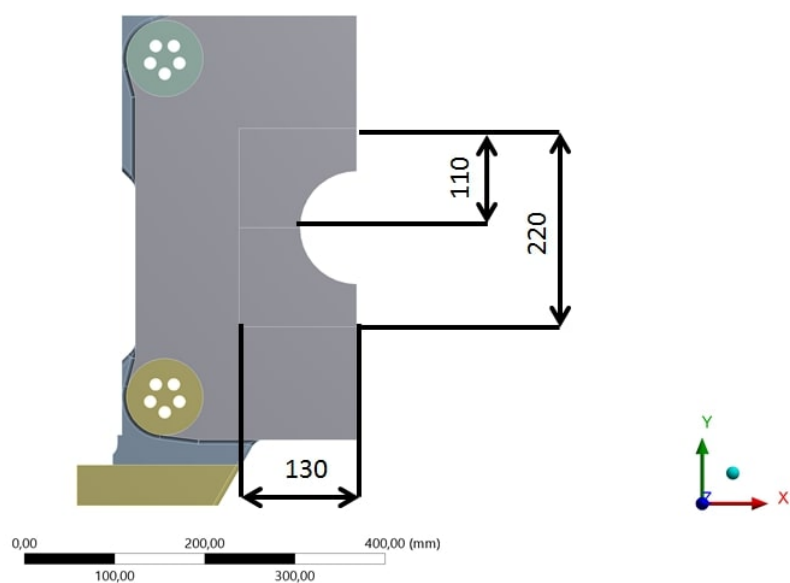
Prílohy

Príloha A

Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov pevnej dosky KM50



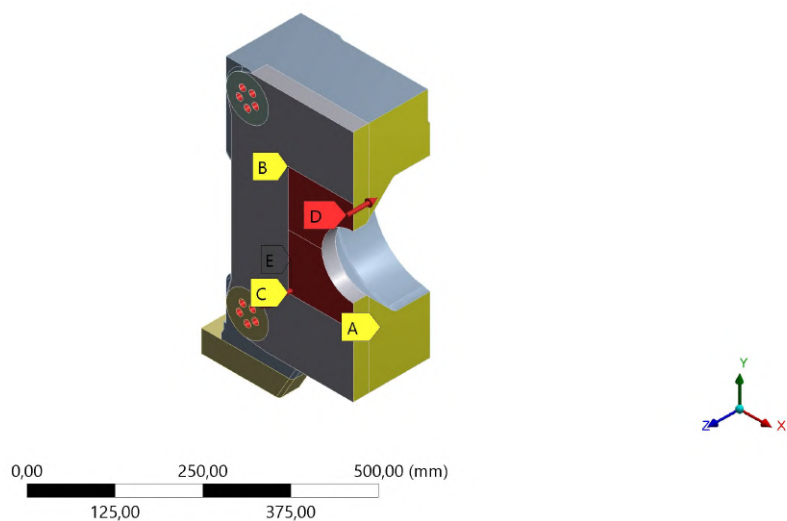
Obr. A.1: Geometria pevnej dosky KM50



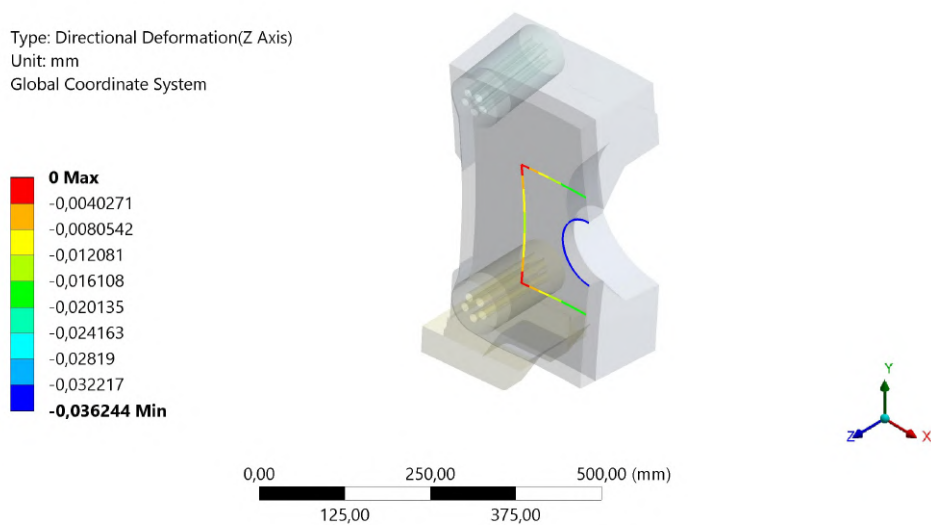
Obr. A.2: Veľkosť minimálnej formy pre vstrekolis KM50

Static Structural

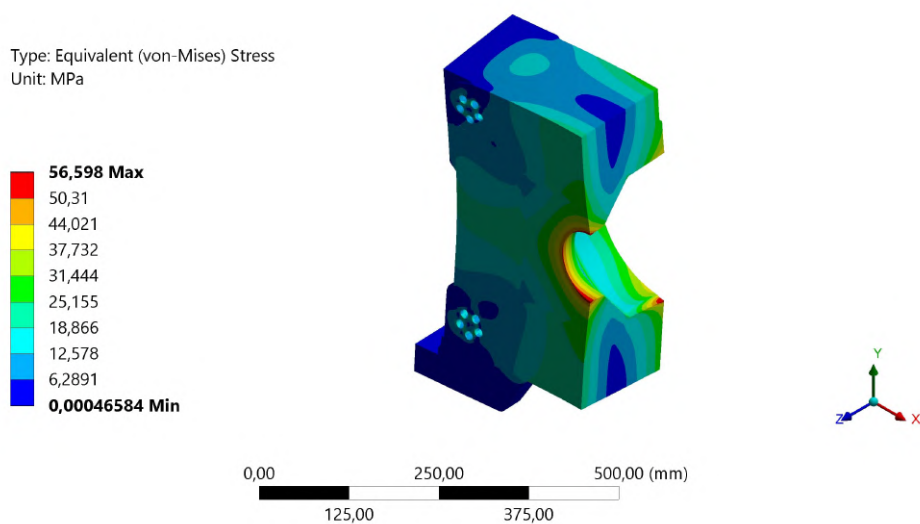
- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Displacement 3
- D** Force: $2,5e+005$ N
- E** Force 2: $2,5e+005$ N



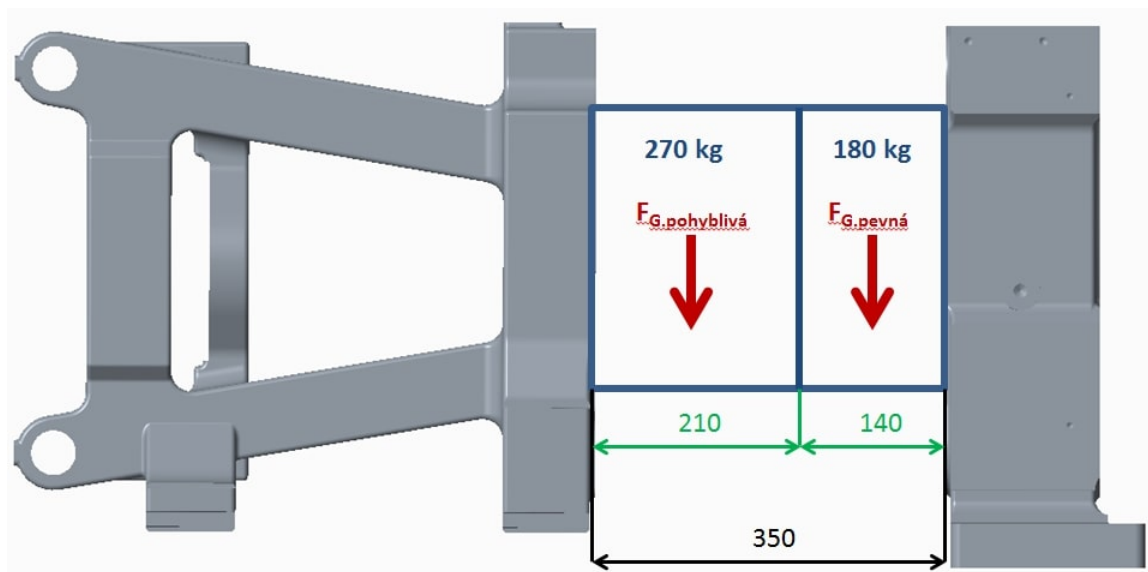
Obr. A.3: Okrajové podmienky pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave



Obr. A.4: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave



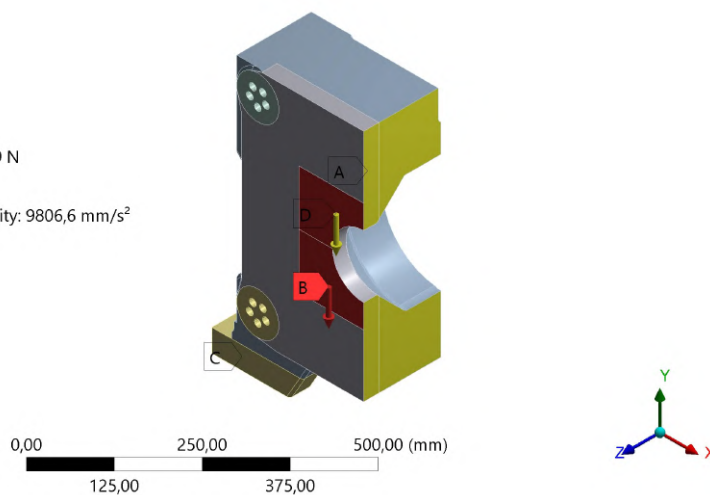
Obr. A.5: Redukované napätie pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave



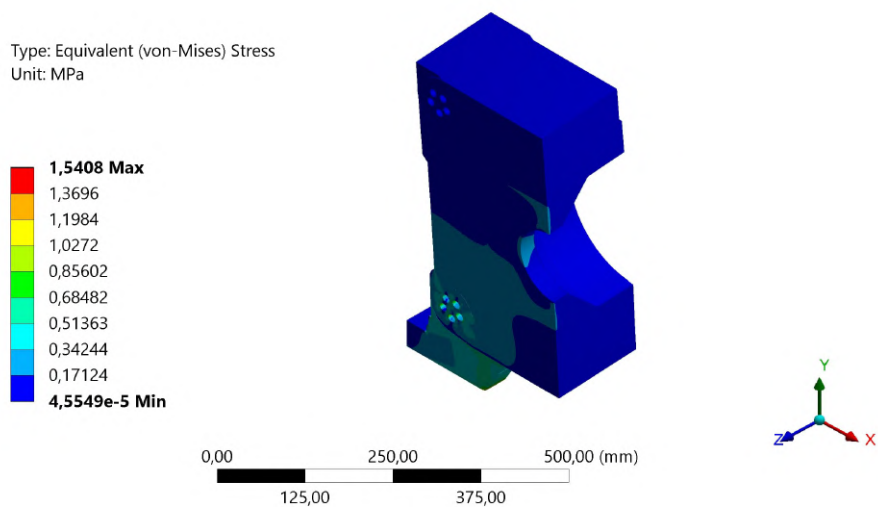
Obr. A.6: Schématické označenie pôsobenia gravitačných síl od formy vo vstrekolise KM50

Static Structural

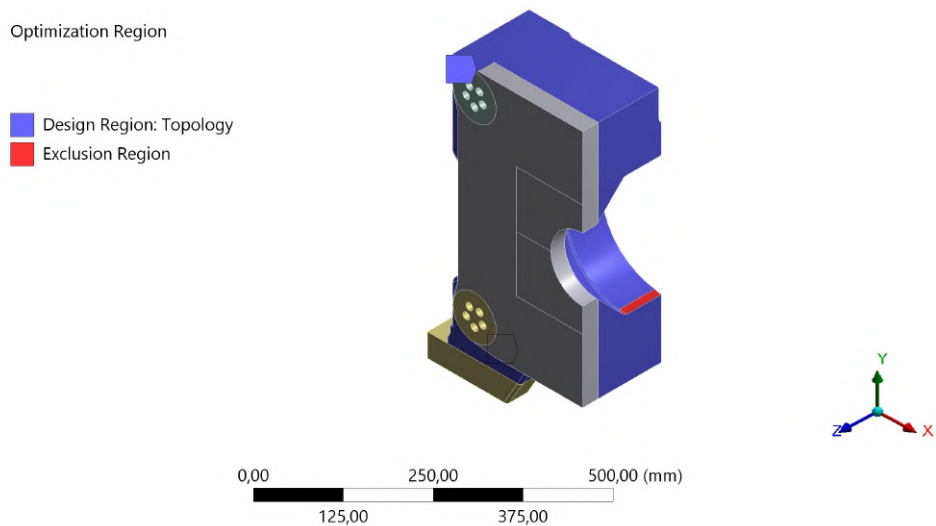
- A** Displacement
- B** Remote Force: 882,9 N
- C** Displacement 2
- D** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²



Obr. A.7: Okrajové podmienky pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave



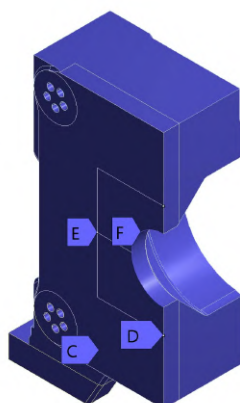
Obr. A.8: Redukované napätie pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave



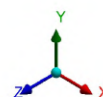
Obr. A.9: Znázornenie objemov pevnej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO

Response Constraint

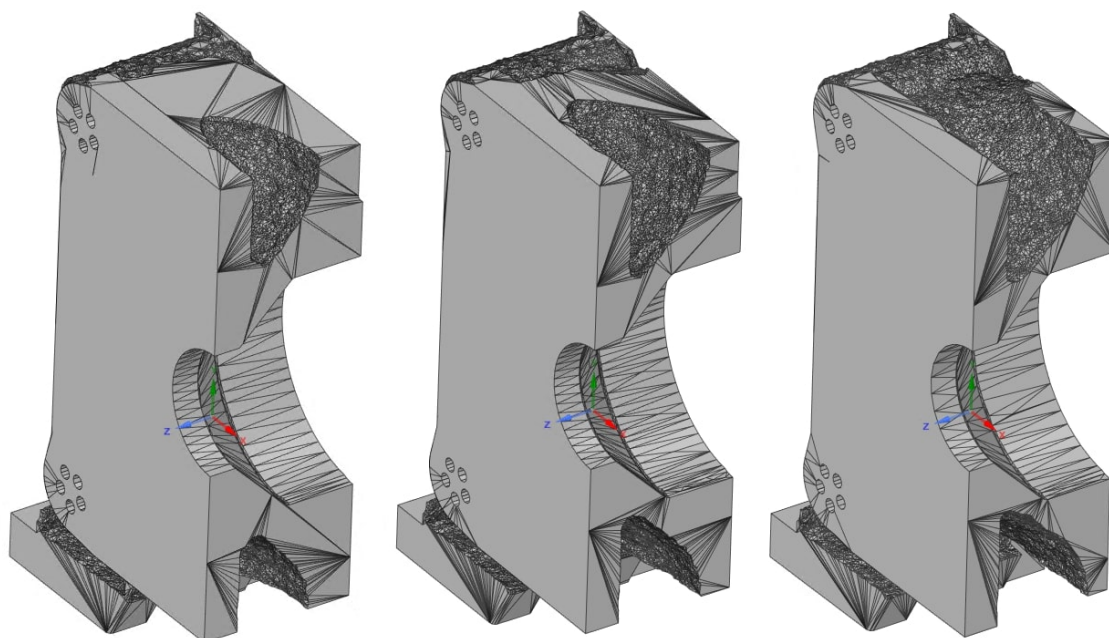
- A** Response Constraint: 80 % Mass
- B** Response Constraint 2: Global von-Mises Stress
- C** Response Constraint 3: Local von-Mises Stress
- D** Response Constraint 4: Displacement
- E** Response Constraint 5: Displacement
- F** Response Constraint 6: Displacement



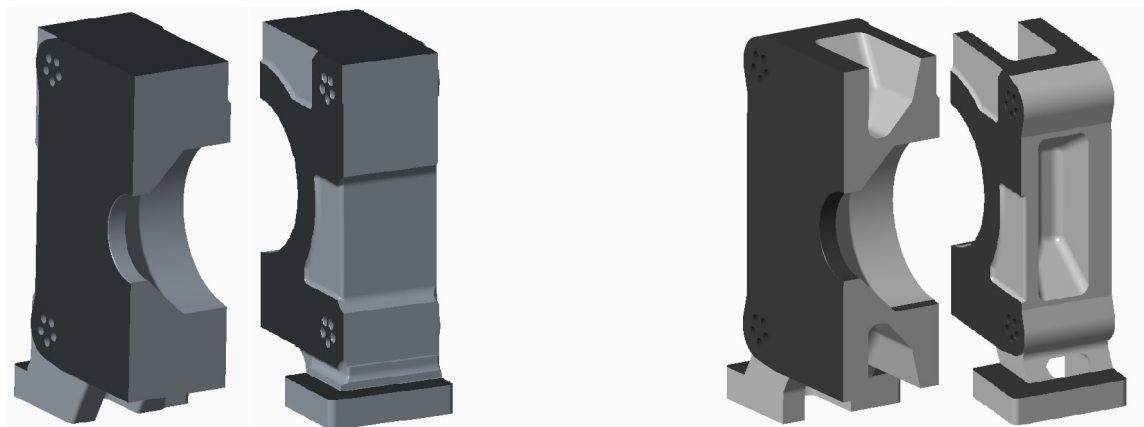
0,00 125,00 250,00 375,00 500,00 (mm)



Obr. A.10: Constrainsy pevnej dosky KM50



Obr. A.11: Výsledky z topologickej optimalizácie pre pevnú dosku KM50 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%



Obr. A.12: Pôvodná pevná doska KM50 (vľavo) Upravená pevná doska KM50 - CAD model (vpravo)

Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [kg]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [kg]
Pôvodná	137	100	0
SpaceClaim - 80%	120	88	17
SpaceClaim - 70%	112	82	25
SpaceClaim - 60%	104	76	33
CAD úprava	105	77	32

Tabuľka A.1: Porovnanie hmotností výsledkov pre pevnú dosku KM50

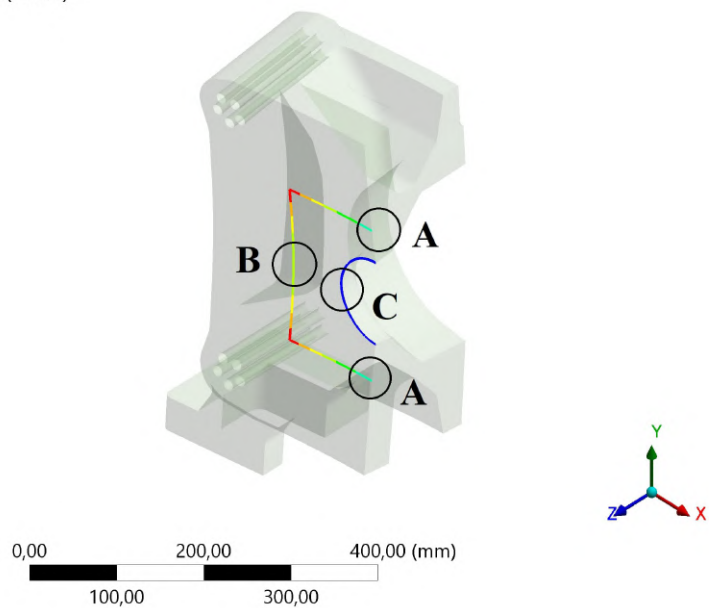
Maximálne dovol. red. napätie	145 MPa
Maximálny dovol. posuv v bode A	0,039 mm
Maximálny dovol. posuv v bode B	0,033 mm
Maximálny dovol. posuv v bode C	0,044 mm

	Pôvod. pevná doska	Uprav. pevná doska
Hmotnosť [kg]	274	210
Odobratie materiálu	0	-23%
Posuv A [mm]	0,02	0,024
Posuv B [mm]	0,013	0,017
Posuv C [mm]	0,036	0,04
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	57	75
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	1,5	1,6

Tabuľka A.2: Porovnanie výsledkov pre pevnú dosku KM50

Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System

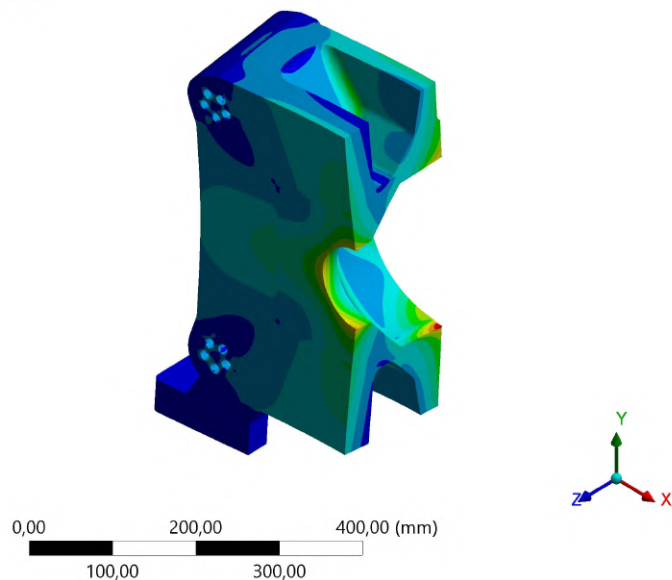
0 Max
-0,0044814
-0,0089628
-0,013444
-0,017926
-0,022407
-0,026888
-0,03137
-0,035851
-0,040333 Min



Obr. A.13: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pevnej dosky KM50 výsledného modelu

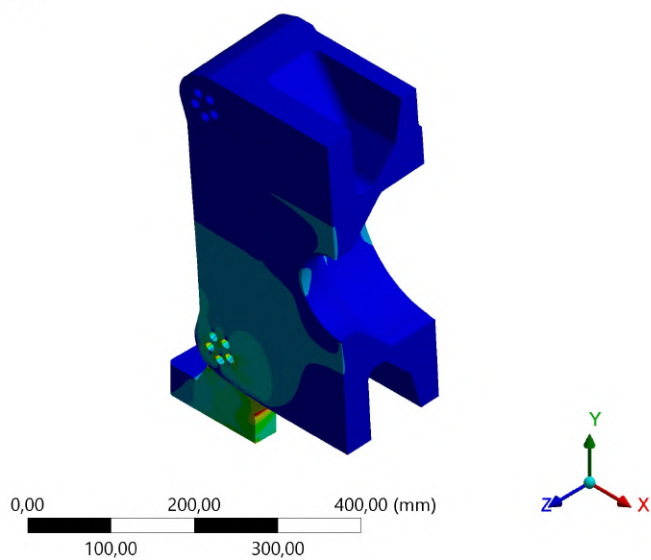
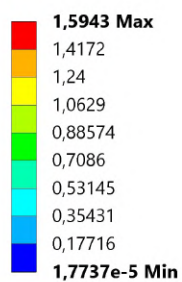
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

74,962 Max
66,633
58,304
49,975
41,647
33,318
24,989
16,66
8,3315
0,0027465 Min



Obr. A.14: Redukované napätie pevnej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

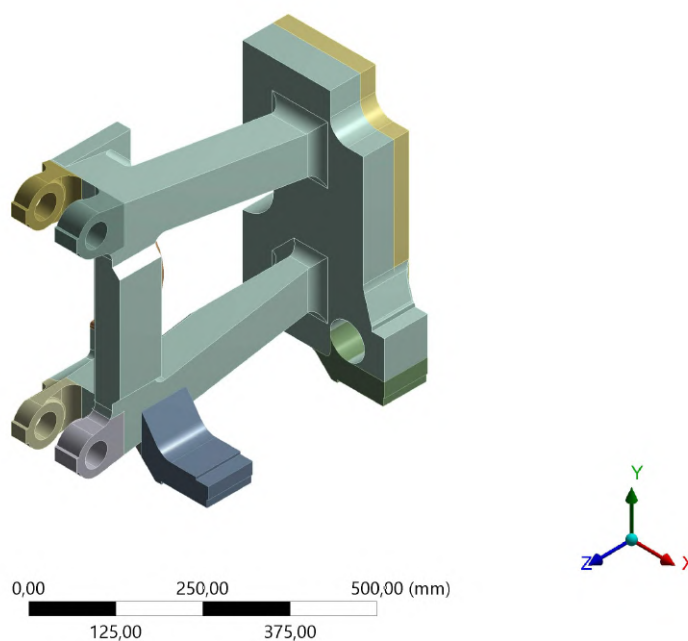
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. A.15: Redukované napätie pevnej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu

Príloha B

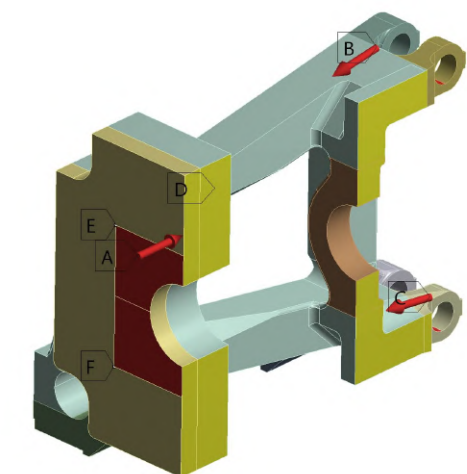
Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov pohyblivej dosky KM50



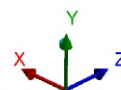
Obr. B.1: Geometria pohyblivej dosky KM50

Static Structural

- A** Force: $2,5e+005$ N
- B** Force 2: $1,2611e+005$ N
- C** Force 3: $1,2611e+005$ N
- D** Displacement
- E** Displacement 2
- F** Displacement 3



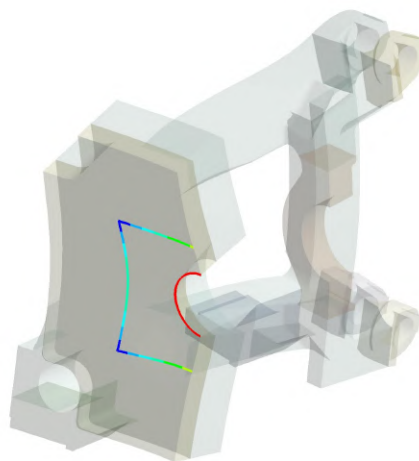
0,00 125,00 250,00 375,00 500,00 (mm)



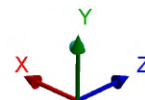
Obr. B.2: Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave

Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System

- 0,030731 Max**
- 0,027316
- 0,023902
- 0,020487
- 0,017073
- 0,013658
- 0,010244
- 0,0068291
- 0,0034146
- 0 Min**

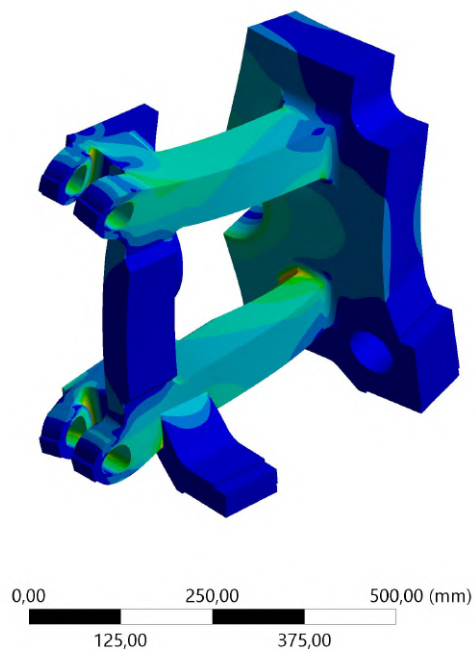
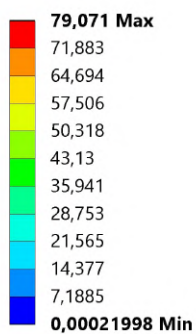


0,00 125,00 250,00 375,00 500,00 (mm)



Obr. B.3: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave

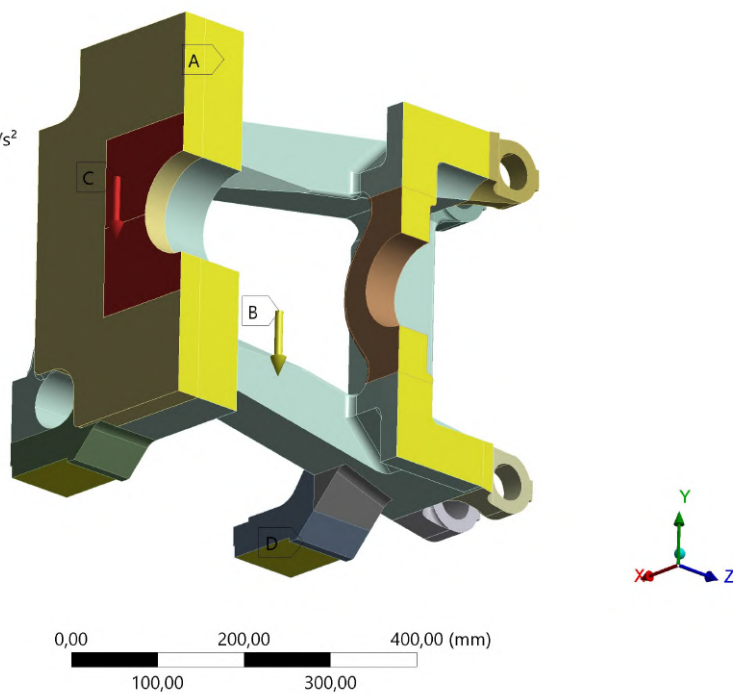
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



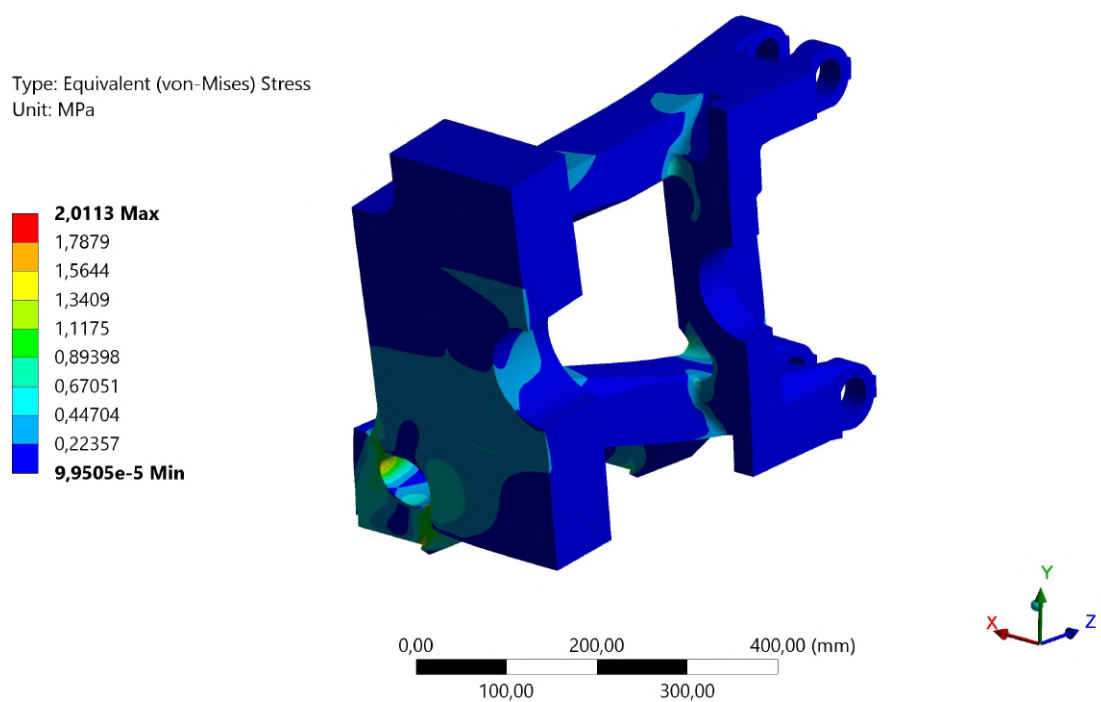
Obr. B.4: Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave

Static Structural

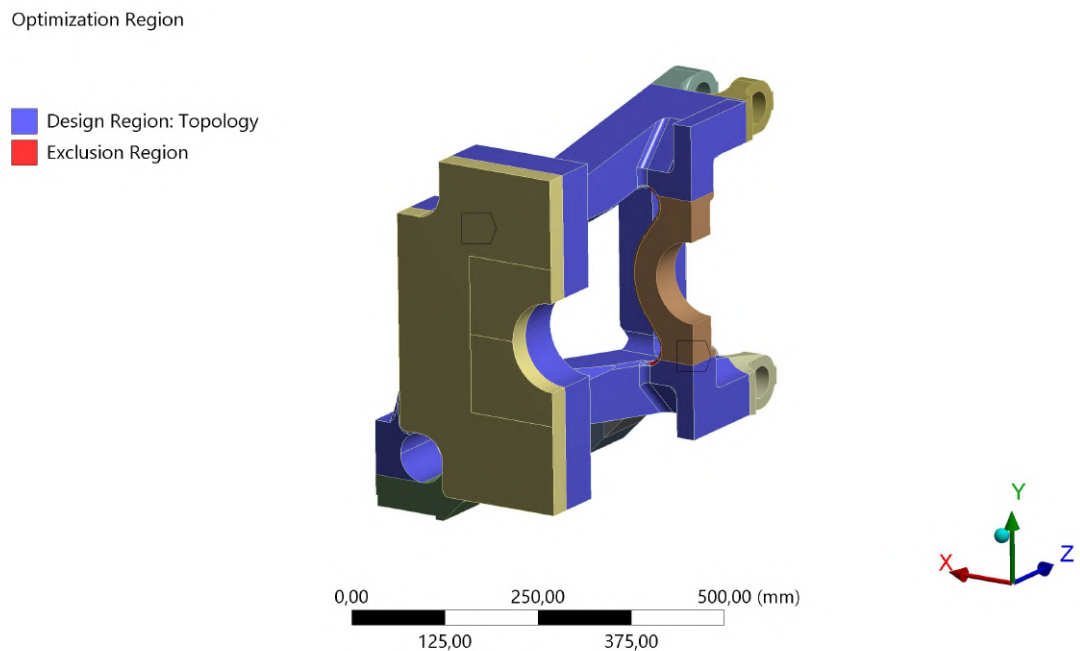
- A** Displacement
- B** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
- C** Remote Force: 1324,3 N
- D** Displacement 2



Obr. B.5: Okrajové podmienky pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave

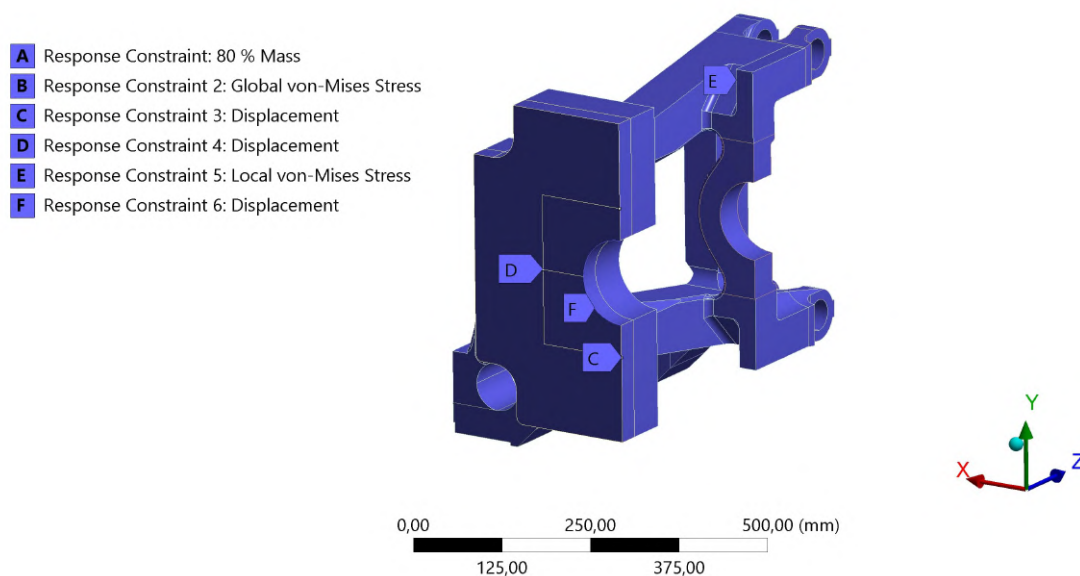


Obr. B.6: Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave

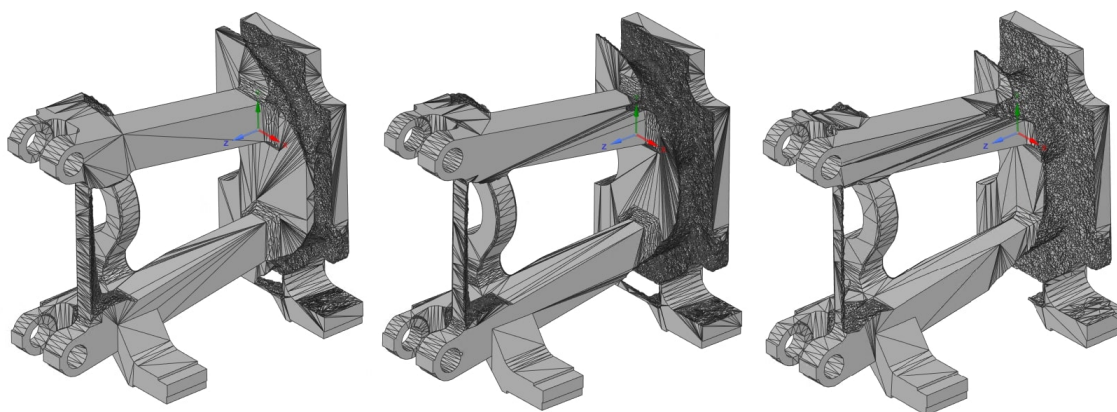


Obr. B.7: Znázornenie objemov pohyblivej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO

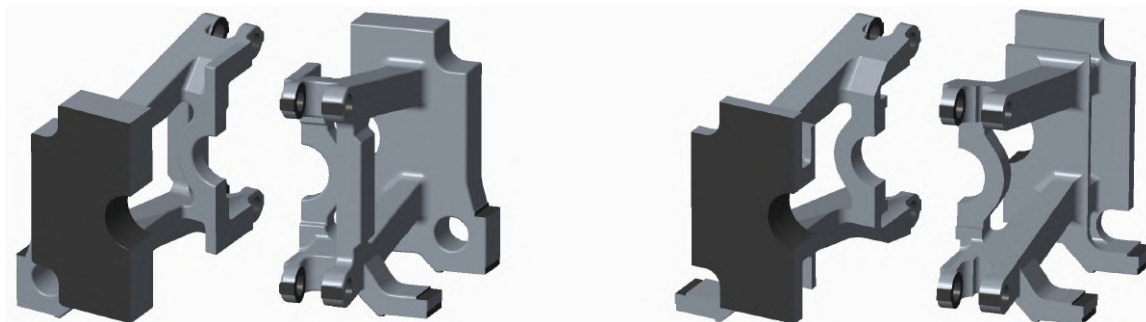
Response Constraint



Obr. B.8: Constrains pohyblivej dosky KM50



Obr. B.9: Výsledky z topologickej optimalizácie pre pohyblivú dosku KM50 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%



Obr. B.10: Pôvodná pohyblivá doska KM50 (vľavo) Upravená pohyblivá doska KM50 - CAD model(vpravo)

Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [kg]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [kg]
Pôvodná	150	100	0
SpaceClaim - 80%	130	87	20
SpaceClaim - 70%	120	80	30
SpaceClaim - 60%	110	73	40
CAD úprava	111	74	39

Tabuľka B.1: Porovnanie hmotností výsledkov pre pohyblivú dosku KM50

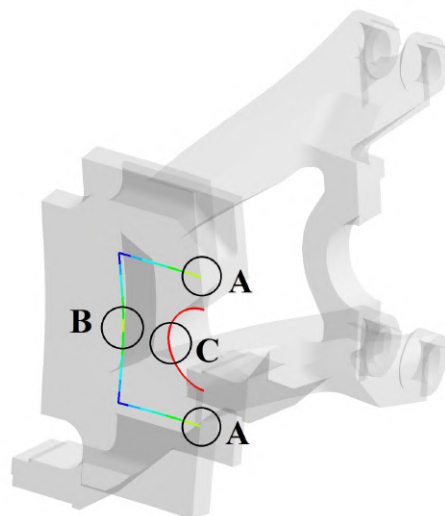
Maximálne dovol. red. napätie 145 MPa
 Maximálny dovol. posuv v bode A 0,039 mm
 Maximálny dovol. posuv v bode B 0,033 mm
 Maximálny dovol. posuv v bode C 0,044 mm

	Pôvod. pohyblivá doska	Uprav. pohyblivá doska
Hmotnosť [kg]	300	222
Odobratie materiálu	0	-26%
Posuv A [mm]	0,018	0,023
Posuv B [mm]	0,013	0,02
Posuv C [mm]	0,031	0,036
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	79	84
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	1,5	4,5

Tabuľka B.2: Porovnanie výsledkov pre pohyblivú dosku KM50

Type: Directional Deformation(Z Axis)
Unit: mm
Global Coordinate System

0,03611 Max
0,033
0,028875
0,02475
0,020625
0,0165
0,012375
0,00825
0,004125
0 Min

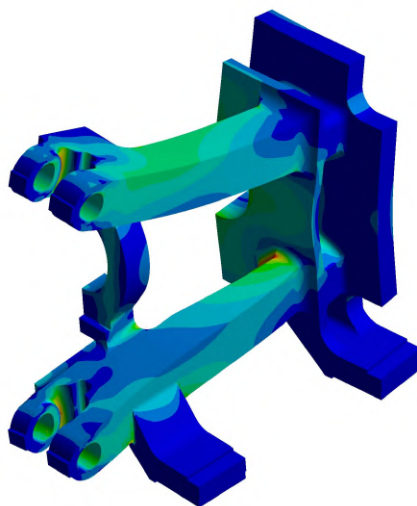


0,00 200,00 400,00 (mm)
100,00 300,00

Obr. B.11: Deformácia v osi Z pre dôležité miesta pohyblivej dosky KM50 výsledného modelu

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

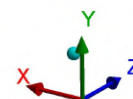
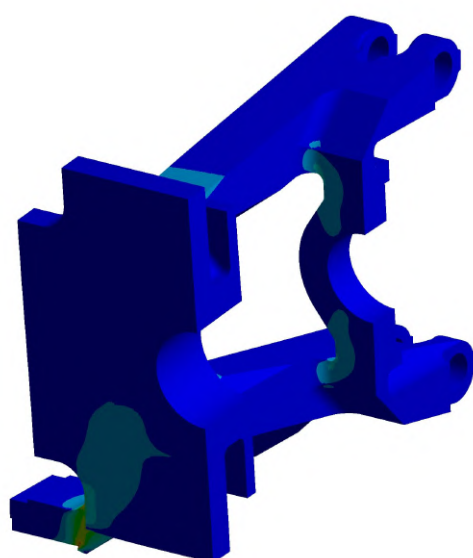
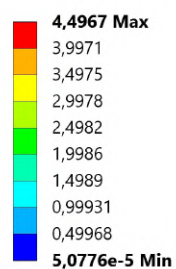
83,649 Max
76,044
68,44
60,835
53,231
45,627
38,022
30,418
22,813
15,209
7,6044
3,3601e-5 Min



0,00 200,00 400,00 (mm)
100,00 300,00

Obr. B.12: Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

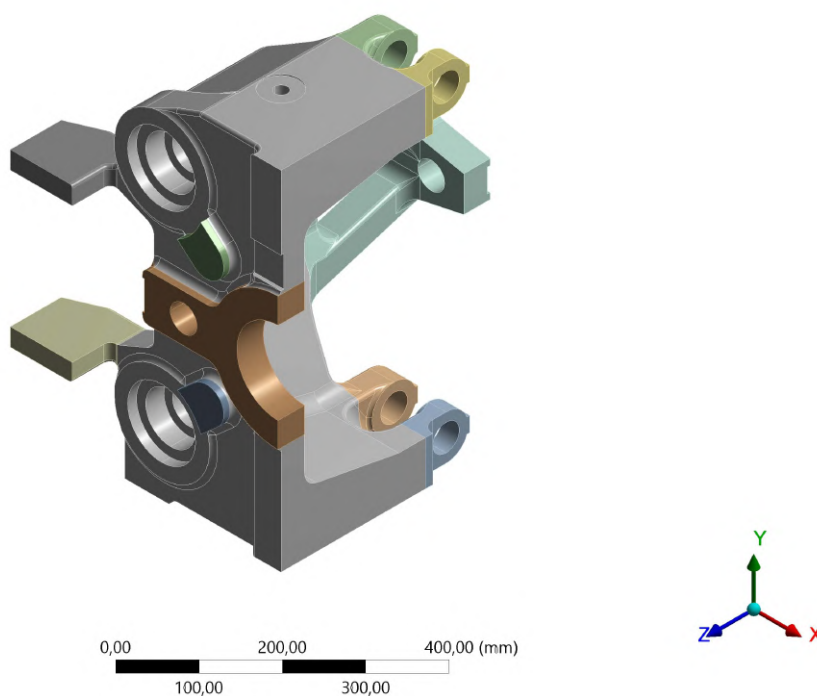
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. B.13: Redukované napätie pohyblivej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu

Príloha C

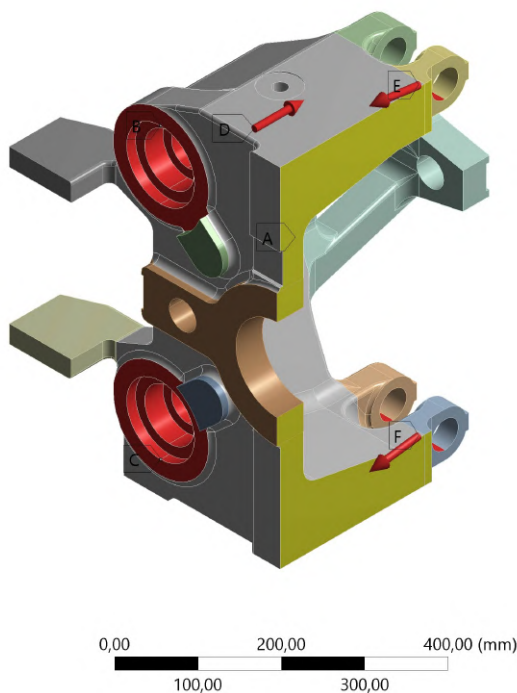
Statická analýza, topologická optimalizácia a verifikácia výsledkov základovej dosky KM50



Obr. C.1: Geometria základovej dosky KM50

Static Structural

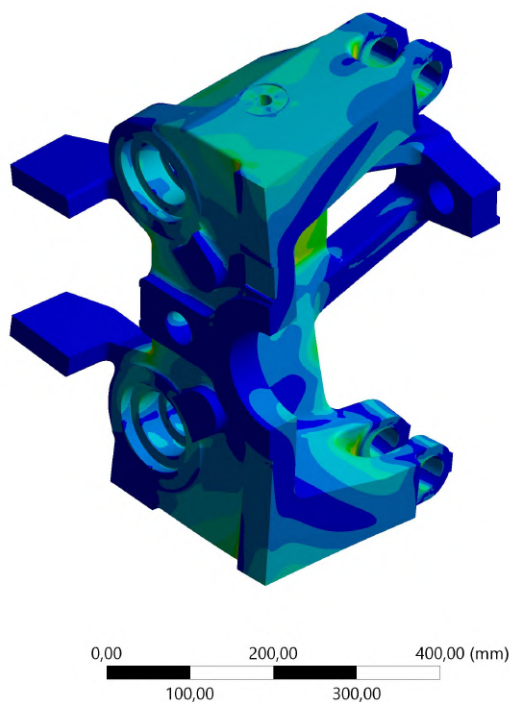
- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Displacement 3
- D** Force: $2,5e+005$ N
- E** Force 2: $1,2611e+005$ N
- F** Force 3: $1,2611e+005$ N



Obr. C.2: Okrajové podmienky základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa

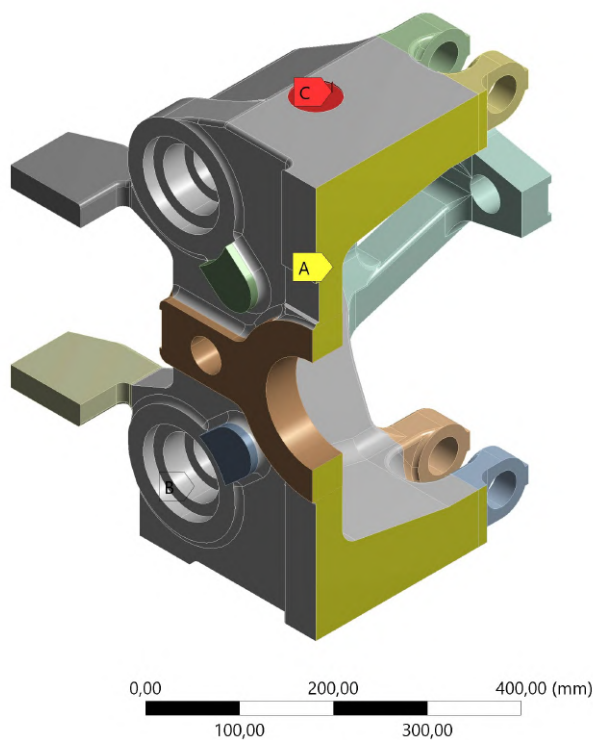
- 85,84 Max**
- 78,036
- 70,232
- 62,429
- 54,625
- 46,822
- 39,018
- 31,214
- 23,411
- 15,607
- 7,8036
- $1,0533e-5$ Min**



Obr. C.3: Redukované napätie základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave

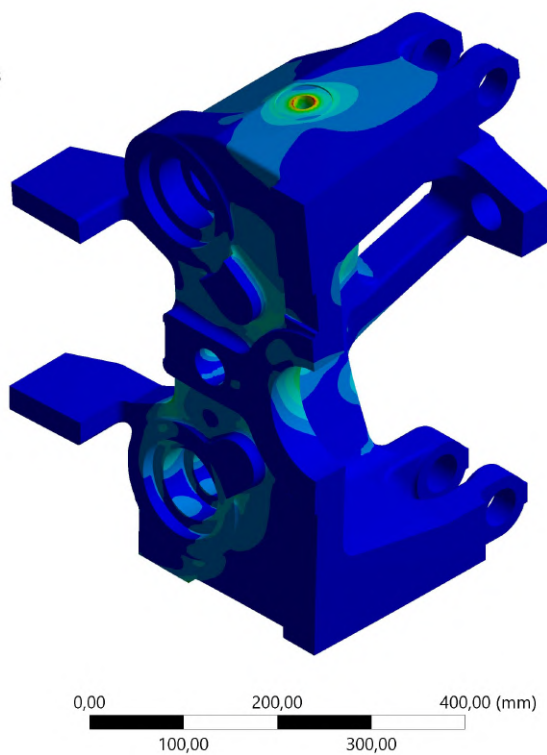
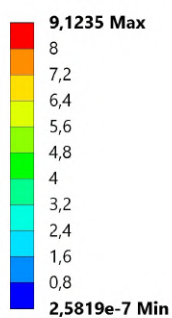
Static Structural

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Force: 12000 N



Obr. C.4: Okrajové podmienky základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave

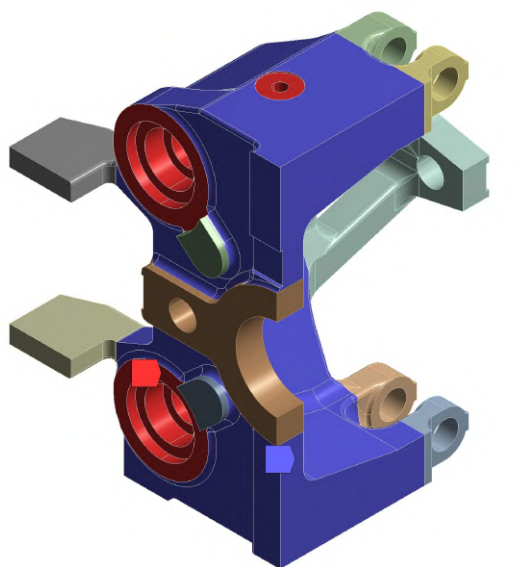
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



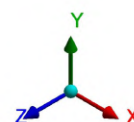
Obr. C.5: Redukované napätie základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave

Optimization Region

■ Design Region: Topology
■ Exclusion Region



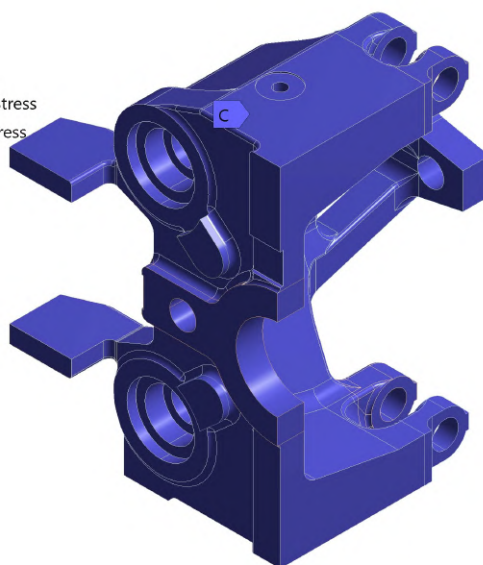
0,00 100,00 200,00 300,00 400,00 (mm)



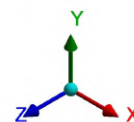
Obr. C.6: Znázornenie objemov základovej dosky KM50, ktoré boli zahrnuté do TO

Response Constraint

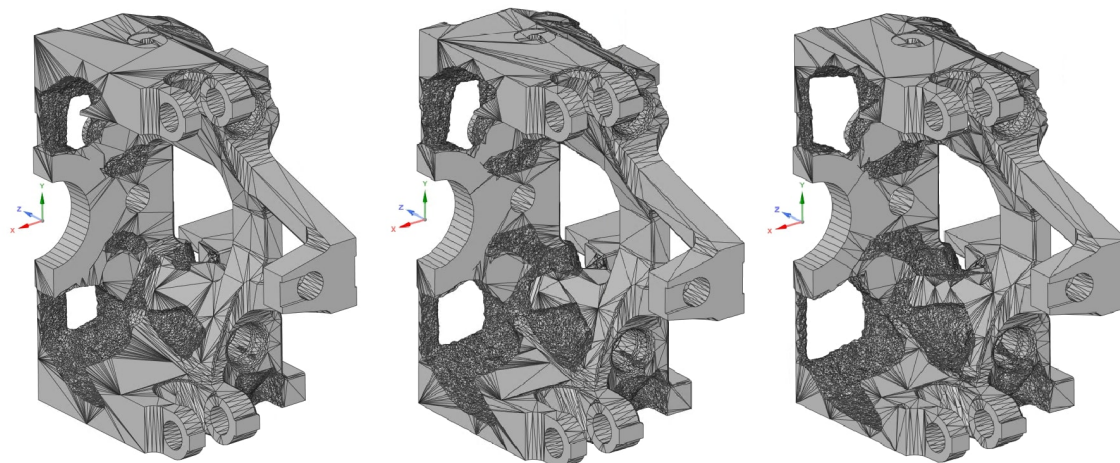
A Response Constraint: 60 % Mass
B Response Constraint 2: Global von-Mises Stress
C Response Constraint 3: Local von-Mises Stress



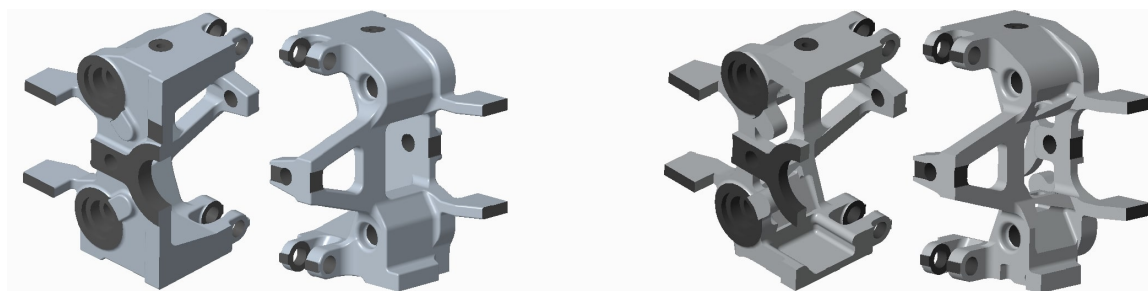
0,00 100,00 200,00 300,00 400,00 (mm)



Obr. C.7: Constrains základovej dosky KM50



Obr. C.8: Výsledky z topologickej optimalizácie pre základovú dosku KM50 - vľavo *MASS* 80%, v strede *MASS* 70%, vpravo *MASS* 60%



Obr. C.9: Pôvodná základová doska KM50 (vľavo) Upravená základová doska KM50 -CAD model(vpravo)

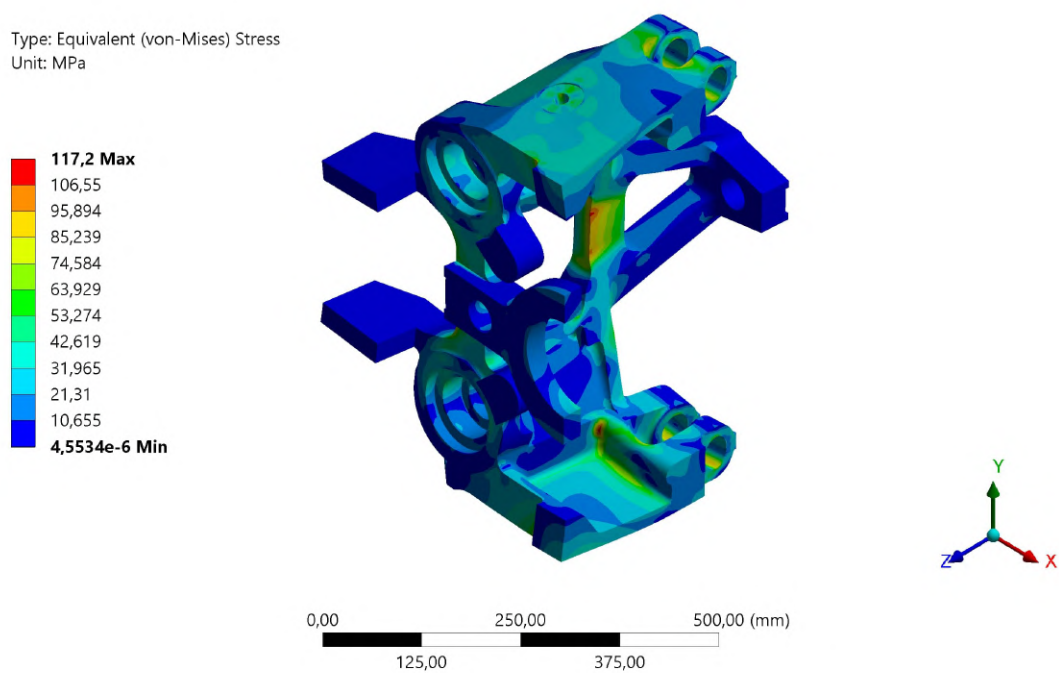
Typ dosky	Hmotnosť polovice dosky [kg]	Podiel pôvodnej hmotnosti [%]	Hmotnosť odobratého materiálu [kg]
Pôvodná	159	100	0
SpaceClaim - 80%	135	85	24
SpaceClaim - 70%	124	78	35
SpaceClaim - 60%	112	70	47
CAD úprava	112	70	47

Tabuľka C.1: Porovnanie hmotností výsledkov pre základovú dosku KM50

Maximálne dovol. red. napätie 145 MPa

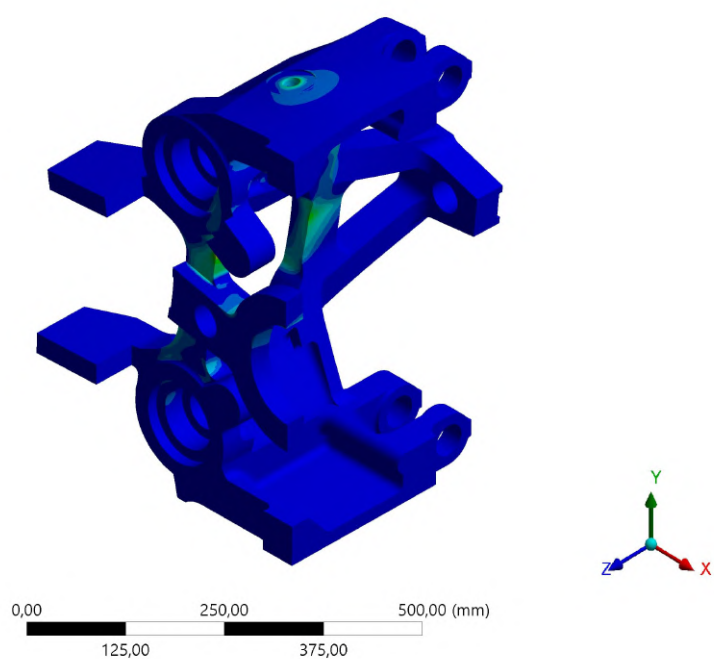
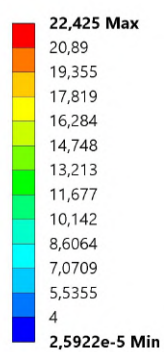
	Pôvod. základová doska	Uprav. základová doska
Hmotnosť [kg]	318	224
Odobratie materiálu	0	-30%
Max. red. nap. 1. zát. stav [MPa]	86	117
Max. red. nap. 2. zát. stav [MPa]	8	22

Tabuľka C.2: Porovnanie výsledkov pre základovú dosku KM50



Obr. C.10: Redukované napätie základovej dosky KM50 v prvom záťažnom stave výsledného modelu

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa



Obr. C.11: Redukované napätie základovej dosky KM50 v druhom záťažnom stave výsledného modelu